TAENIA SOLIUM: UN PARASITO COSMOPOLITA

INVESTIGACION y CIENCIA

MAYO 2006
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GENES DE LA LONGEVIDAD

LA ACIDIFICACION DE LOS OCEANOS

LOS LIMITES DE LA RAZON

BLINDAJES ESPACIALES

MOLECULAS LIMPIADORAS



00356
9 770210 136004



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Mayo de 2006

Número 356

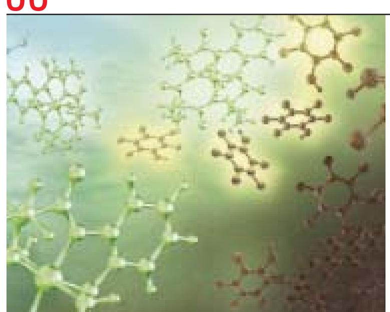




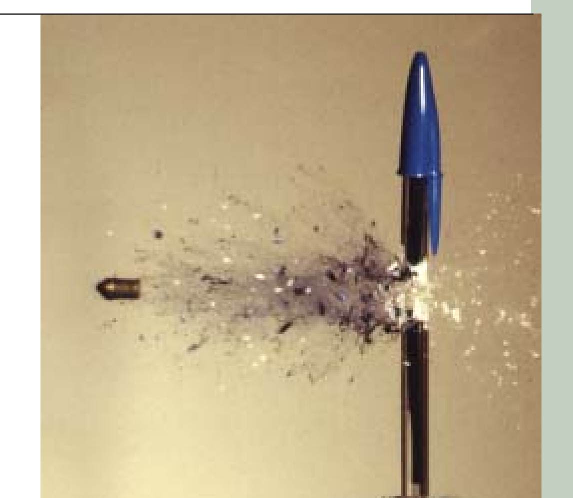




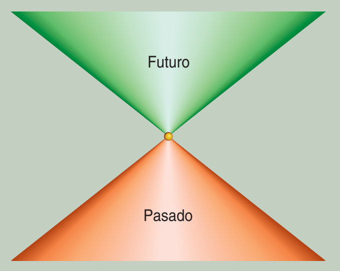











Futuro
Pasado







DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *Los genes de la longevidad*; M.ª Rosa Zapatero: *Blindajes espaciales*; Luis Bou: *Arte y lógica de la conversación* y *Los límites de la razón*; Joandomènec Ros: *La acidificación de los océanos*; Juan Manuel González Mañas: *Moléculas limpiadoras*; J. Vilardell: *Toma ultrarrápida de imágenes de ondas de choque, explosiones y disparos*, *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

Mente programada. «¿Hasta qué punto tiene la herencia un papel en la conducta? Al menos en los vertebrados inferiores, numerosas características de la percepción visual (el sentido de la orientación y de la ubicación en el espacio, la percepción del movimiento y sensaciones afines) están integradas en el organismo; no necesitan aprenderse. La teoría sobre los instintos y el carácter hereditario de la conducta se está tornando ahora mucho más aceptable que hace 15 años, cuando carecíamos de una base satisfactoria para explicar la organización del comportamiento innato. Cada animal llega al mundo con unos patrones de conducta propios de su especie. Lo mismo que su estructura biológica, gran parte de su comportamiento es producto de la evolución.» —R. W. Sperry [Nota de la redacción: Roger Wolcott Sperry recibió el premio Nobel de fisiología y medicina en 1981.]

Pruebas de deslealtad. «El año pasado, el presidente Eisenhower solicitó a Detlev W. Bronk, presidente de la Academia Nacional de Ciencias, su opinión sobre si debería permitirse realizar investigaciones no clasificadas con subvención oficial a científicos acusados de deslealtad. La comisión de Bronk sostuvo que la investigación científica debía juzgarse por sus propios méritos: una contribución a la cura del cáncer 'no sería menos beneficiosa para la humanidad porque se debiera a un comunista'.»

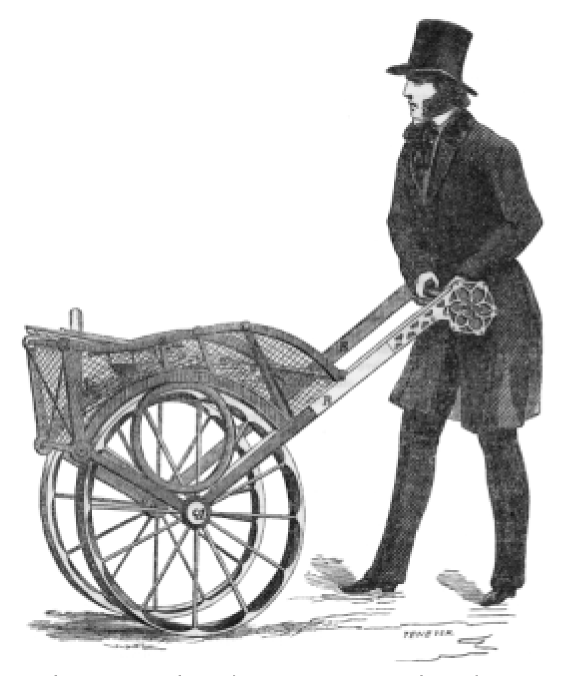
...cien años

San Francisco: Tras la tragedia. «En vano buscaríamos en la historia un paralelo dramático al patético espectáculo de doscientos mil vecinos de San Francisco a medio vestir y todos carentes de hogar contemplando, con desesperada impotencia, desde el anfiteatro montañoso circundante, cómo desaparecían de la faz de la Tierra más de sesenta kilómetros cuadrados de su pintoresca y apasionadamente querida capital del Oeste. No es éste un momento para entregarse a tópicos moralizantes, pero creemos que la relación de los hechos quedaría incompleta sin una referencia al espontáneo raudal de generosidad que al instante se abatió sobre aquellas afligidas gentes procedente de todos los estados y ciudades de la Unión. Capital y trabajo, ferrocarriles e industrias, clérigos y comediantes, todos se han unido; víveres y artículos de primera necesidad inundan ahora la ciudad devastada.»

Guerra y enfermedades. «Durante casi los dos últimos siglos, en las guerras que abarcaron largos períodos de tiempo, las enfermedades se cobraron por término medio cuatro vidas por cada una que derivaron de las heridas. Estas cifras sorprenden si se comparan con la marca conseguida por el ejército japonés de Manchuria, donde sólo murió un hombre por enfermedad por cada cuatro y medio que perecieron en combate. Tal completa inversión de las estadísticas de las potencias occidentales constituye, según el mayor Louis L. Reaman, el auténtico triunfo de Japón. Los resultados se consiguieron a partir del estudio cuidadoso de la sanidad e higiene militares y mediante concienzudos exámenes bacteriológicos de las aguas a lo largo de las rutas de marcha y en las proximidades de los campamentos.»

...ciento cincuenta años

Agrimensura. «Nuestro grabado ilustra la adaptación de un sencillo instrumento de mano medidor de superficies a la medición de extensiones de tierra. Las ruedas ligeras con adornos están enlazadas con bielas a los discos registradores del manillar. Para usar el instrumento, el agrimensor lo empuja por delante de sí sobre el terreno. Se elude así el uso de la tediosa cadena de agrimensor, con sus paradas y reinicios, ajustes y cálculos, y se ahorra tiempo y se evitan errores.»



Instrumento de agrimensura, supera a la antigua cadena de agrimensor, 1856.

Alerta, criminales. «Afirma la *Medical Times and Gazette*, 'el dedo de la ciencia señala al asesino con estricnina, y disipa sus ilusorias esperanzas; el grano de polvo blanco, que él espera que lleve silenciosamente a su víctima a la tumba, provoca en cambio las más violentas y delatoras convulsiones; una diminuta fracción de un grano, depositada sobre las membranas del animal tras su muerte, exhibe, mediante los ensayos adecuados, un conjunto de anillos resplandecientes e iridiscentes a los ojos del experto en química.»

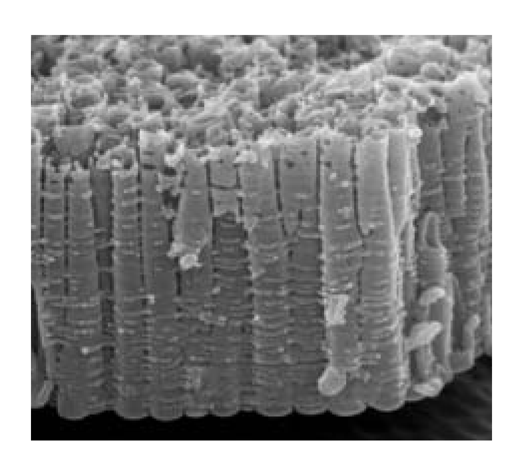
APUNTES

ENERGIA

Un trabajo luminoso

Para disociar el agua con luz solar, proceso que tendría una gran importancia en una futura economía del hidrógeno, hay tres procedimientos: células solares, microorganismos y fotocatalizadores. Las células solares destacan por su eficacia, pero resultan caras. Los microorganismos, baratos, sólo producen cantidades minúsculas de hidrógeno. Los fotocatalizadores deben trabajar en el agua, pero los que pueden hacerlo sólo reaccionan a la luz ultravioleta; las sustancias que absorben la porción visible del espectro solar tienden a descomponerse en un medio acuoso. Para aumentar el rendimiento, se ha pensado en los nanotubos de dióxido de titanio. La forma tubular es unas cinco veces más eficaz que la laminar. El equipo de Craig Grimes, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ha aumentado el rendimiento de la conversión del ultravioleta en hidrógeno hasta llegar al 12 por ciento con nanotubos de dióxido de titanio de seis micras de longitud. Ahora, este grupo y el de Allen Bard, de Texas, empiezan a elaborar nanotubos de dióxido de titanio que reaccionan a la luz visible. Han añadido carbono a los nanotubos de dióxido de titanio; así se desplazan hacia la parte visible del espectro las longitudes de onda que absorben. Se ha duplicado de esa forma el rendimiento bajo una mezcla de luz ultravioleta y luz visible. El paso siguiente es dar con un material para el nanotubo cuyo rendimiento sea alto con luz visible pura. Un tejado cubierto con fotocatalizadores de luz visible del 12 por ciento de rendimiento generaría al día el equivalente en hidrógeno de unos 11 litros de gasolina.

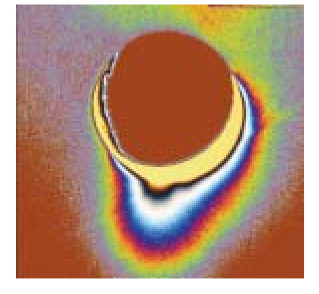
—Eric Smalley



Para obtener hidrógeno, los fotocatalizadores de nanotubos de titanio, modificados para que reaccionasen a la luz visible, disociarían con energía solar el agua.

SISTEMA SOLAR

Más sobre Encélado



Erupción de un géiser en Encélado, vista en colores falsos por la sonda Cassini.

Los géiseres de hielo del polo sur de Encélado, una luna de Saturno, avalan una posible existencia de un océano subterráneo. En tres acercamientos, la sonda espacial Cassini ha visto allí un penacho de hielo y polvo que se proyecta miles de kilómetros por encima de la corteza agrietada y rugosa. El penacho vuelve en su mayor parte a la superficie, en forma de nieve que cae sobre sus llanuras. Las cubren unas “bolas de nieve” imponentes. El resto del penacho escapa de la gravedad del satélite. Parece que se integra en el anillo más externo de Saturno, el anillo E, de unos 300.000 kilómetros de ancho. Se cree que, como el géiser Old Faithful del parque nacional de Yellowstone, estos surtidores de Encélado están alimentados por dióxido de carbono gaseoso. El calor interior que impulsa la descarga podría generarse por el movimiento de placas tectónicas similares a glaciares y por fuerzas de marea. Esos movimientos hacen pensar que 10 metros, o menos, por debajo de la superficie helada tal vez haya un océano líquido, que podría incluso albergar vida.

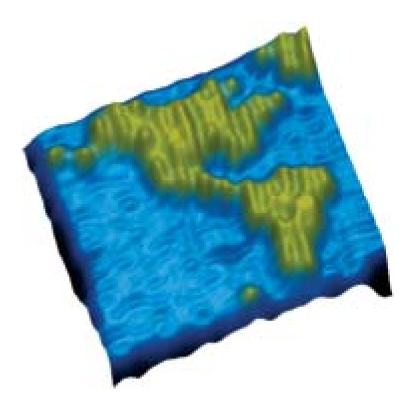
—Charles Q. Choi

NANOTECNIA

Papiroflexia con ADN

La técnica papirofléxica con ADN desarrollada por Paul Rothemund, del Instituto de Tecnología de California, pliega una hebra larga de ADN, cuantas veces sea necesario, para crear cualquier forma deseada. Los pliegues se sujetan con fragmentos cortos de ADN. Las figuras que se han publicado en *Nature* tienen unos 100 nanómetros de ancho y constan de unos 200 píxeles (cada píxel es una cadena corta de nucleótidos, las unidades del ADN). La tendencia del ADN a su alineación espontánea con secuencias coincidentes significa que esas formas se autoensamblarán automáticamente si la secuencia de cada molécula es la adecuada. En el diseño de una estructura se tarda un día; se necesita sólo un programa de ordenador muy sencillo. Con estas papiroflexias se podrían crear dispositivos si se les añadiesen elementos electrónicos o enzimas. Algunos experimentos intentan crear estructuras tridimensionales.

—Charles Q. Choi



Nanoarte: América, representada con ADN.

ALLEN BARD *Universidad de Texas en Austin (arriba)*; NASA/JPL/*Instituto de Ciencia Espacial (centro)*; NATURE *(abajo)*

AVIACION

Interferencias

Levantar la prohibición del uso de los teléfonos móviles durante los vuelos, cambio que está considerando la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos, podría ser una mala idea: la electrónica portátil puede interferir la navegación con GPS, cada vez más utilizada en los aterrizajes. Investigadores de la Universidad Carnegie Mellon llevaron, con permiso, una analizador de frecuencias inalámbrico en 37 vuelos comerciales. Descubrieron que los pasajeros hacían de una a cuatro llamadas por vuelo con sus teléfonos. Además, el grupo también descubrió que otras fuentes de a bordo (posiblemente reproductores de DVD, dispositivos de juegos u ordenadores portátiles) emitían en la frecuencia del GPS. Tales observaciones concuerdan con los informes de seguridad anónimos que han reseñado interrupciones del funcionamiento de los sistemas de navegación por la interferencia de ese tipo de aparatos. Si se levantara la prohibición, la electrónica portátil tendría que cumplir con las normas de las líneas aéreas, que prohíben las interferencias de cabina.

—J. R. Minkel



Los teléfonos móviles pueden interferir las señales del GPS.

VISION

En rojo

La visión de los colores podría haberse originado en los humanos y en primates emparentados para distinguir rubores y palideces. Mientras que los receptores de color de las aves y las abejas son sensibles a todos los colores del espectro, dos de los tres tipos de fotorreceptores de color de los humanos y otros primates del Viejo Mundo alcanzan su mayor sensibilidad con la luz de unos 550 nanómetros de longitud de onda. Según un equipo de neurobiólogos del Instituto de Tecnología de California, este parecido de las sensibilidades de hombre y antropoide responde a una común optimización de la capacidad de distinguir cambios sutiles en los tonos de la piel, debidos a las variaciones en la concentración de hemoglobina oxigenada en la sangre. Les valdría a los primates para distinguir si una posible pareja tiene un color saludable o si un enemigo se ha quedado pálido de miedo. Que los primates del Viejo Mundo tiendan a ser lampiños de cara y nalgas, lo que favorece la legibilidad de las señales de color, viene a respaldar la idea.

—Charles Q. Choi



La percepción del rojo de las mejillas explicaría por qué la vista de los primates es especialmente sensible a ese color.

HIDROCARBUROS

¿Por qué suelen hallarse en zonas desérticas y árticas?

La mayoría de los yacimientos de petróleo y de gas natural acabaron donde hoy están llevados por la tectónica de placas (el desplazamiento con el tiempo de grandes placas sobre la superficie terrestre). El petróleo y el gas natural proceden en su mayor parte de microorganismos muertos que quedaron enterrados enseguida en ambientes anóxicos, donde el oxígeno escasea tanto, que esos restos no se descompusieron. La falta de oxígeno les permitió conservar sus enlaces hidrógeno-carbono, ingrediente imprescindible para la generación de combustibles fósiles. Las cuencas oceánicas que la tectónica de placas estuviera formando y las dislocaciones continentales proporcionaron las condiciones necesarias para el enterramiento rápido en aguas anóxicas. Los ríos rellenaron esas cuencas con sedimentos que acarreaban abundantes restos orgánicos. Como en las cuencas la circulación del agua es limitada, mantienen unos niveles de oxígeno más bajos que los mares abiertos. La tectónica de placas creó también la “olla a presión” que lentamente transformó los organismos en petróleo y gas. El proceso duró millones de años, lapso en el que el petróleo y el gas migraron por el planeta a lomos de las placas. Como esos hidrocarburos son mucho menos densos que el agua, acabaron abriéndose paso hacia la superficie. O bien, las dislocaciones, las colisiones entre masas terrestres y otras fuerzas tectónicas liberaron el petróleo y el gas ya madurados de las profundidades y los propulsaron hacia las cuencas sedimentarias, donde quedaron atrapado antes de que escapasen a la superficie terrestre. Así se formaron los yacimientos de petróleo y gas. La misma tectónica de placas que creó las ubicaciones y las condiciones para los enterramientos anóxicos produjo también las trayectorias geológicas que luego siguieron esas cuencas sedimentarias. La deriva continental, la subducción y la colisión con otros continentes generaron movimientos que transportaron los hidrocarburos de los pantanos, deltas fluviales y climas suaves —donde se depositan la mayoría de los organismos— a los polos y los desiertos, adonde hoy han ido a parar por casualidad.

—Roger N. Anderson



CREATAS/AGE FOTOSTOCK (*arriba*); MITSUAKI IWAGO *Minden Pictures* (*centro*); MATT COLLINS (*abajo*)

Los genes de la longevidad

Un grupo de genes que controlan las defensas del organismo ante situaciones de estrés mejoran también el estado de salud y alargan la vida. El conocimiento de su actividad podría llevarnos a comprender las claves para prolongar la esperanza de vida y desterrar enfermedades asociadas al envejecimiento

David A. Sinclair y Lenny Guarente



1. LA ACTIVACION DE LOS GENES de la longevidad cambiaría el arco típico de la vida humana: en lugar de comenzar con una etapa de vitalidad y crecimiento que dejase paso a una ancianidad decadente, una persona podría prolongar la juventud que siente a los 50 hasta los 70, 90 o pasados los 100.

Basta fijarse en el kilometraje y el año del modelo de un coche para hacerse una idea del estado en que se encuentra. El desgaste del uso y el paso del tiempo se habrán cobrado un peaje inevitable. Lo mismo podría aplicarse al envejecimiento humano. Pero la comparación tiene su talón de Aquiles en la diferencia crucial entre las máquinas y los organismos: en los sistemas biológicos el deterioro no es inexorable, pues éstos responden al entorno y utilizan su propia energía para defenderse y autorrepararse.

Se admitía antaño que el envejecimiento constituía, además de un proceso de deterioro, la prolongación del desarrollo genéticamente controlado de un organismo. Alcanzada la madurez de un sujeto, sus "genes del envejecimiento" tomaban las riendas de su progreso hacia la muerte. Una hipótesis que ha quedado desacreditada. El envejecimiento corresponde sólo a un desgaste debido al decaimiento de los mecanismos de mantenimiento y reparación del cuerpo. La selección natural, parece lógico, no encuentra razón alguna para mantenerlos operativos, una vez que el individuo ha pasado la edad reproductora.

No obstante, se ha descubierto que una familia de genes implicados en la respuesta del organismo ante factores de estrés (calor excesivo o escasez de alimento o agua, por ejemplo) mantienen también las funciones naturales de defensa y reparación, con independencia de la edad. Mediante la optimización de los mecanismos de supervivencia, estos genes hacen que las posibilidades del individuo de superar una crisis sean máximas. Y si permanecen activados el tiempo suficiente, mejoran de forma extraordinaria el estado de salud y la esperanza de vida. Se les diría en las antípodas de los genes del envejecimiento: se trata de genes de la longevidad.

Nos planteamos esa hipótesis hará unos 15 años. Suponíamos que la evolución habría favorecido un sistema regulador universal para coordinar la respuesta ante el estrés ambiental. Si identificáramos el gen o los genes que controlan y regulan la duración de la vida de un organismo, los mecanismos de defensa naturales en cuestión podrían convertirse en armas contra las enfermedades y la decadencia que acompañan al envejecimiento.

En fecha reciente se han descubierto varios genes —*daf-2*, *pit-1*, *amp-1*, *clk-1* y *p66Shc*— que afectan a la resistencia al estrés y a la longevidad en animales de laboratorio. Tal hallazgo induce a pensar en la posibilidad de un mecanismo fundamental para la supervivencia ante la adversidad. Nuestros grupos de investigación se han centrado en el gen *SIR2*; sus variantes se hallan

CARY WOLINSKY (*fotografías*); JEN CHRISTIANSEN (*fotocomposición*)



presentes en todos los organismos estudiados hasta la fecha, de levaduras a humanos. Copias extra del gen aumentan la longevidad en levaduras, nemátodos y moscas de la fruta. Nos proponemos determinar si desarrollan la misma función en micromamíferos (ratones).

Al tratarse de uno de los primeros genes de la longevidad identificados, el *SIR2* es también el que mejor se ha caracterizado. Aquí nos centraremos en su actividad, que ilustra el alargamiento de la esperanza de vida y la mejora del estado de salud merced a un mecanismo de supervivencia regulado genéticamente. Se acumulan las pruebas que sugieren que el *SIR2* puede ser el regulador clave de tal mecanismo.

Silenciamiento génico

¿Por qué envejecen las células de la levadura del pan? ¿Basta un gen para controlar el envejecimiento de este organismo unicelular? En nuestro empeño por hallar respuesta, descubrimos que el *SIR2* corresponde a uno de los genes de la longevidad. (Varios expertos consideraron absurda la idea de que el estudio de la esperanza de vida de la levadura arrojaría luz sobre el envejecimiento humano.) En la levadura, su envejecimiento se mide a partir del número de veces que las células progenitoras se dividen para producir células progenie antes de morir. La esperanza de vida de una célula de levadura corresponde a unas 20 divisiones.

Uno de los autores (Guarente) comenzó por muestrear colonias de levaduras para localizar células insólitamente perdurables confiado en hallar genes responsables de tal longevidad. Descubrió una mutación en el gen *SIR4*, que codifica parte de un complejo proteico que contiene la enzima Sir2. La mutación en *SIR4* provocaba que las unidades de la proteína Sir2 se reunieran en la región más repetitiva del genoma de la levadura, una secuencia que alberga los genes que codifican las factorías de proteínas de la célula: el ADN ribosómico (ADNr). Por término medio, existen más de 100 de estas repeticiones de ADNr en el genoma de una célula de levadura. Poco estables, son propensas a "recombinarse" unas con otras, un proceso que en humanos conduce a la aparición de cáncer, la enfermedad de Huntington y numerosos trastornos. Nuestros descubrimientos en levaduras sugerían que el envejecimiento de las células progenitoras estaba causado por alguna forma de inestabilidad del ADNr mitigada por las proteínas Sir.

De hecho, observamos un tipo sorprendente de inestabilidad del ADNr. Tras dividirse varias veces, las células progenitoras se desprenden de copias extra del ADNr en forma de anillos que salen del genoma. Estos círculos extracromosómicos de ADNr se copian al tiempo que se replican los cromosomas de la célula progenitora antes de la división celular, pero permanecen en el núcleo de la célula progenitora en lo sucesivo. Así, una célula progenitora acumula un número creciente de círculos extracromosómicos (CEC) que terminan por suponer su condena, quizá porque la copia de los CEC consume tantos recursos, que la célula no puede seguir replicando su propio genoma.

Cuando se añadió una copia extra del gen *SIR2* a la célula de levadura, se suprimió la formación de los círculos de ADNr y aumentó en un 30 por ciento la esperanza de vida. Este hallazgo explicaba la intervención de *SIR2* en la longevidad en levaduras; pronto descubrimos, sin embargo, que las copias extra de *SIR2* prolongaban la vida también en nemátodos, hasta en un 50 por ciento. Semejante coincidencia nos sorprendió. Por un lado, afectaba a organismos separados por una enorme distancia evolutiva. Por otro, el gusano adulto cuenta sólo con células que no se dividen y, por tanto, el mecanismo replicativo del envejecimiento de las levaduras no podía aplicarse a los gusanos. ¿Cuál era entonces la función del gen *SIR2*?

No tardamos en observar que el gen codificaba una enzima con una actividad inédita. El ADN celular rodea a las histonas. Estos complejos proteicos portan marcas químicas (grupos acetilo, por ejemplo) que determinan cuán densamente empaquetan al ADN. La eliminación de grupos acetilo de las histonas aumenta la condensación del complejo, con lo que el ADN se torna inaccesible a las enzimas responsables de la extracción de los círculos de ADNr. De esa forma desacetilada del ADN se dice que se encuentra silenciada, pues cualesquiera que sean los genes que se hallen en tales regiones del genoma se tornan inaccesibles a la activación.

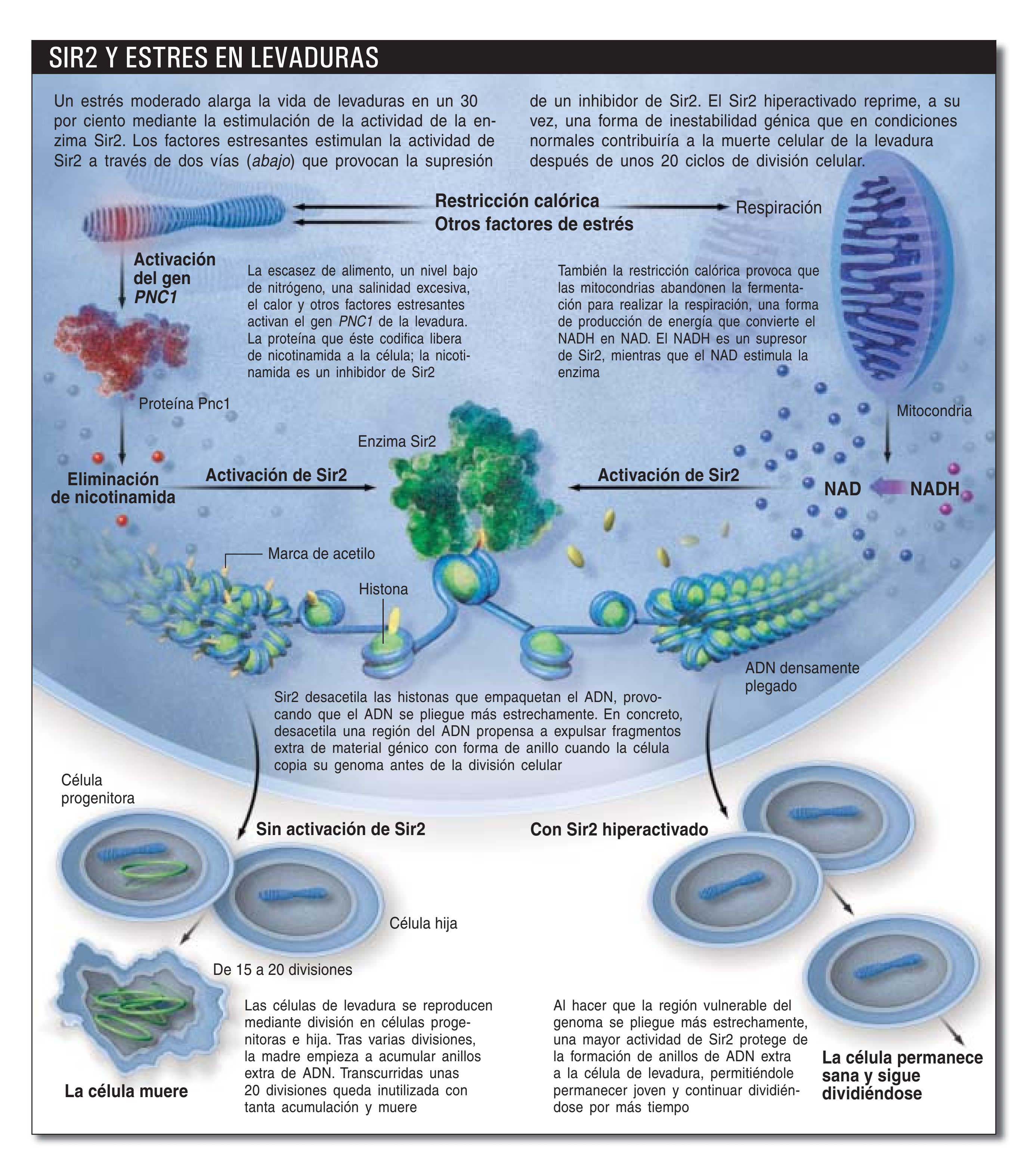
Era ya sabido que las proteínas Sir estaban implicadas en el silenciamiento de genes. De hecho, SIR viene de regulador silenciador de información ("silent information regulator"). Corresponde a una de varias enzimas que eliminan marcas de acetilo de las histonas. Nuestro descubrimiento consistió en develar su singularidad: su actividad enzimática requiere de la presencia de NAD, una molécula de tamaño reducido ubicua que canaliza numerosas reacciones metabólicas. Esta asociación entre Sir2 y NAD resultaba muy sugestiva, pues relacionaba la actividad de Sir2 con el metabolismo y, por tanto, potencialmente con la conexión entre dieta y envejecimiento observada en condiciones de restricción calórica.

La restricción calórica

Seguir una dieta baja en calorías constituye el método habitual de aumentar la longevidad de un animal. Descubierto hace más de 70 años, continúa siendo el único tratamien-

Resumen/Aumento de la longevidad

- Los genes que controlan la capacidad para hacer frente a las adversidades provocan cambios que, de forma temporal, dotan al individuo de recursos extra para la supervivencia.
- Si se activa durante un período prolongado, esta respuesta al estrés alarga la vida y previene la enfermedad en organismos muy alejados filogenéticamente.
- Quizá las sirtuinas, una familia de genes, sean las reguladoras de este mecanismo de supervivencia.
- El conocimiento de su actividad, beneficiosa para la salud y la longevidad, conduciría al desarrollo de tratamientos médicos y, por fin, a una vida más larga y libre de enfermedades.



to de eficacia probada. Consiste en reducir el consumo de alimento de un individuo entre un 30 y un 40 por ciento de lo que se considera normal para su especie. Desde ratas y ratones hasta perros y posiblemente primates, los animales que se someten a esta dieta viven más y gozan de mejor estado de salud durante su vida prolongada. Se evitan numerosas enfermedades, incluidos el cáncer, la diabetes y trastornos neurodegenerativos. El organismo parece estar superdotado para la supervivencia. El único precio a pagar por ello es una pérdida de fecundidad.

Durante decenios, la ciencia se ha afanado en comprender el mecanismo que opera tras la restricción calórica y en desarrollar medicinas que mimeticen sus beneficios para la salud. El fenómeno se atribuyó a una simple ralentización del metabolismo celular (la producción de energía a partir de moléculas combustibles), con la consiguiente reducción de los subproductos tóxicos en respuesta a una menor cantidad de comida.

Pero no parece una interpretación correcta. La restricción calórica no

ralentiza el metabolismo en mamíferos; en levaduras y gusanos, el metabolismo se acelera y sufre alteraciones. Creemos, por tanto, que la restricción calórica constituye un estresante biológico que, lo mismo que la escasez de alimento, induce una respuesta defensiva que aumenta las probabilidades de supervivencia del organismo. En los mamíferos, sus efectos abarcan cambios en las defensas celulares, la reparación, la producción de energía y la activación de la muerte celular programada (apoptosis). ¿Qué función podría desempeñar Sir2 en tal proceso? Abordamos primero la restricción calórica en organismos sencillos.

En levaduras, la restricción de la disponibilidad de alimento afecta a dos rutas que incrementan la actividad enzimática de Sir2. Por una parte, se activa el gen *PNC1*, que produce una enzima responsable de eliminar de la célula la nicotinamida, una molécula similar a la vitamina B_3, que reprime a Sir2. Concorde con la idea de que la restricción calórica constituye un factor de estrés que activa una respuesta de supervivencia, *PNC1* se estimula también ante un incremento de temperatura, una salinidad excesiva y otros estresantes suaves que prolongan el tiempo de vida en levaduras.

La segunda ruta que la restricción calórica induce en levaduras afecta a la respiración. Este modo de producción de energía genera NAD en forma de subproducto, al tiempo que disminuyen los niveles de NADH. No sólo el NAD activa a Sir2, sino que, además, el NADH inhibe a la enzima; la alteración de la relación NAD/NADH en la célula repercute, pues, de una manera determinante en la actividad de Sir2.

Establecido que el estrés biológico que prolonga la vida incrementa la actividad de Sir2, se imponía dar respuesta a otra cuestión: ¿se requería la presencia de Sir2 para promover la longevidad? Parece que sí. Una forma de averiguarlo consiste en eliminar su gen y determinar si, a pesar de ello, el efecto permanece. En organismos tan complejos como la mosca de la fruta, la restricción calórica necesita *SIR2* para prolongar la vida. Puesto que el cuerpo de una mosca de la fruta adulta contiene numerosos tejidos análogos a los órganos de los mamíferos, sospechamos que

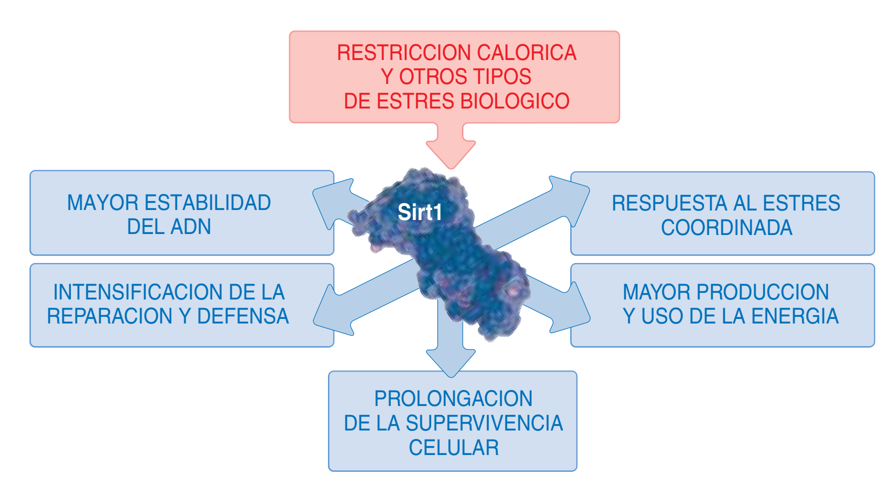
RUTAS GENICAS QUE PROLONGAN LA VIDA

Se ha identificado un grupo de genes que influyen en la longevidad de diversos organismos. Lo mismo que *SIR2* y sus genes relacionados (las sirtuinas), algunos de ellos prolongan la esperanza de vida en presencia de un mayor número de copias del gen o cuando aumenta la actividad de la proteína que éste codifica. Muchos genes y sus proteínas ejercen, en cambio, un efecto negativo sobre la duración de la vida; la reducción de su actividad potencia la longevidad.

En gusanos, por ejemplo, el gen que codifica receptores celulares para la insulina y el factor de crecimiento de tipo insulina 1 (IGF-1) se llama *daf-2*. La supresión de la actividad de *daf-2* en gusanos adultos bloquea la señalización vía insulina e IGF-1, y prolonga la vida de los organismos hasta en un 100 por ciento. Se promueve también la longevidad con la supresión de otros genes relacionados con el crecimiento y la interposición en las rutas moleculares que dichos genes activan.

Varios de los genes que figuran en la lista inferior, o bien sus proteínas, regulan o son regulados por sirtuinas en condiciones de restricción calórica. Ello sugiere que formarían parte de una red reguladora del envejecimiento. Los autores especulan si *SIR2* y sus afines pueden orquestar esta red.

GEN O RUTA (EQUIVALENTE HUMANO)	ORGANISMO/ PROLONGACION DE LA VIDA	CON MAS O CON MENOS, MEJORA	PRINCIPALES PROCESOS AFECTADOS	POSIBLES EFECTOS SECUNDARIOS DE LA MANIPULACION
SIR2 (*SIRT1*)	Levadura, gusano, mosca/30 por ciento	Con más	Supervivencia celular, metabolismo y respuesta al estrés	No se conocen
TOR (*TOR*)	Levadura, mosca, gusano/del 30 al 250 por ciento	Con menos	Crecimiento celular y detección de nutrientes	Infecciones, cáncer
Proteínas Daf/FoxO (Insulina, IGF-1)	Gusano, mosca, ratón/100 por ciento	Con menos	Crecimiento y metabolismo de la glucosa	Enanismo, esterilidad, pérdida cognitiva, degeneración tisular
Genes Clock (genes *CoQ*)	Gusano/30 por ciento	Con menos	Síntesis de la coenzima Q	No se conocen
Amp-1 (*AMPK*)	Gusano/10 por ciento	Con más	Metabolismo y respuestas al estrés	No se conocen
Hormona del crecimiento (Hormona del crecimiento)	Ratón, rata/ del 7 al 150 por ciento	Con menos	Regulación del tamaño corporal	Enanismo
P66Shc (*P66Shc*)	Ratón/27 por ciento	Con menos	Producción de radicales libres	No se conocen
Catalasa (*CAT*)	Ratón/15 por ciento	Con más	Detoxificación del peróxido de hidrógeno	No se conocen
Prop1, pit1 (*Pou1F1*)	Ratón/42 por ciento	Con menos	Actividad pituitaria	Enanismo, esterilidad, hipotiroidismo
Klotho (*Klotho*)	Ratón/ del 18 al 31 por ciento	Con más	Regulación de la insulina, IGF-1 y vitamina D	Resistencia a la insulina
Methuselah (*CD97*)	Mosca/35 por ciento	Con menos	Resistencia al estrés y comunicación neuronal	No se conocen



2. LA ENZIMA SIRT1 parece concertar los efectos beneficiosos para la salud y la longevidad que resultan de la restricción calórica en mamíferos. La escasez de alimento y otros factores de estrés biológico aumentan la actividad de Sirt1, que, a su vez, altera otros procesos del interior celular. Mediante el estímulo de la producción de ciertas moléculas de señalización, como la insulina, Sirt1 puede coordinar también la respuesta al estrés en todo el cuerpo. La enzima opera a través de la modificación de otras proteínas.

TAMI TOLPA (*ilustración*); LUCY READING-IKKANDA (*diagrama*)

la restricción calórica requiere *SIR2* también en los mamíferos.

No obstante, si los humanos se proponen alguna vez cosechar los beneficios de la restricción calórica, no deberían recurrir a la aplicación de una dieta radical. Se necesitan fármacos que modulen la actividad de Sir2 y de moléculas similares (las sirtuinas). Uno de esos compuestos activadores de sirtuinas (o STAC, de "Sirtuin-activating compound"), el resveratrol, reviste un interés particular: presente en el vino tinto, lo sintetizan diversas plantas ante situaciones de estrés. Al menos otras 18 sustancias producidas por vegetales en respuesta al estrés modulan a las sirtuinas. Podría quizás inferirse de ello que las plantas recurren a dichas moléculas para controlar sus propias enzimas Sir2.

El suministro de resveratrol a levaduras, gusanos o moscas, o la aplicación de una restricción calórica a su dieta les alarga la vida en un 30 por ciento, pero sólo si poseen el gen *SIR2*. Además, la vida prolongada de una mosca que sintetice Sir2 en sobreabundancia, ya no puede alargarse más por medio de resveratrol ni de una dieta hipocalórica. Para justificar tales datos se aduce que el resveratrol y la restricción calórica prolongan la vida de las moscas de la fruta mediante la activación de Sir2.

Las moscas a las que se suministra resveratrol no sólo viven más —pese a comer sin forzada limitación—, sino que, además, no sufren la pérdida de fertilidad que a menudo ocasiona la restricción calórica. Sin duda, éstas son buenas noticias para el desarrollo de tratamientos de enfermedades humanas basados en moléculas dirigidas a Sir2. Antes, sin embargo, debemos comprender mejor la actividad de Sir2 en mamíferos.

El efecto protector de las sirtuinas

La versión en mamíferos del gen *SIR2* de levaduras se conoce como *SIRT1* ("*SIR2* homólogo 1"). Codifica la proteína Sirt1, que desempeña la misma actividad enzimática que Sir2; además, desacetila una mayor variedad de proteínas del núcleo y del citoplasma celular. Se han identificado algunas de estas dianas de Sirt1, que, según se sabe, controlan procesos críticos: apoptosis, defensas celulares y metabolismo. Parece, por tanto, que la función potenciadora de la longevidad de la familia génica *SIR2* se ha conservado en mamíferos. Y, según cabía presumir, en los organismos de mayor tamaño y mayor complejidad las rutas seguidas por las sirtuinas para cumplir su cometido han adquirido a su vez mayor complejidad.

El incremento de Sirt1 en ratones y ratas permite que sobrevivan células en unas condiciones de estrés que en una situación de normalidad dispararían la apoptosis. Sirt1 cumple esa misión mediante la regulación de la actividad de otras proteínas celulares clave (p53, FoxO y Ku70), implicadas en la determinación del umbral apoptótico o en la activación de la reparación celular. De este modo, Sirt1 potencia los mecanismos celulares de reparación mientras gana tiempo para que los mismos funcionen.

En el transcurso de una vida, la pérdida de células por apoptosis puede constituir un factor de importancia para el envejecimiento, sobre todo en los tejidos no renovables como el corazón y el cerebro. Con la ralentización de la muerte celular, las sirtuinas hallarían un modo de promover la salud y la longevidad. Un ejemplo sorprendente de la capacidad de Sirt1 para potenciar la supervivencia en las células de mamífero se observa en la cepa mutante Wallerian del ratón. En estos múridos, una mutación génica (la duplicación de un gen) confiere a las neuronas una redoblada resistencia al estrés, que las protege del infarto cerebral, la toxicidad inducida por la quimioterapia y las enfermedades neurodegenerativas.

En 2004, el equipo dirigido por Jeffrey D. Milbrandt, de la Universidad de Washington en San Luis, demostró que esta mutación aumentaba la actividad de una enzima que cataliza la síntesis de NAD; el NAD adicional parece proteger a las neuronas vía activación de Sirt1. Además, observaron que el resveratrol, activador de sirtuinas, proporcionaba un efecto protector a las neuronas de ratones normales similar al que provocaba la mutación Wallerian.

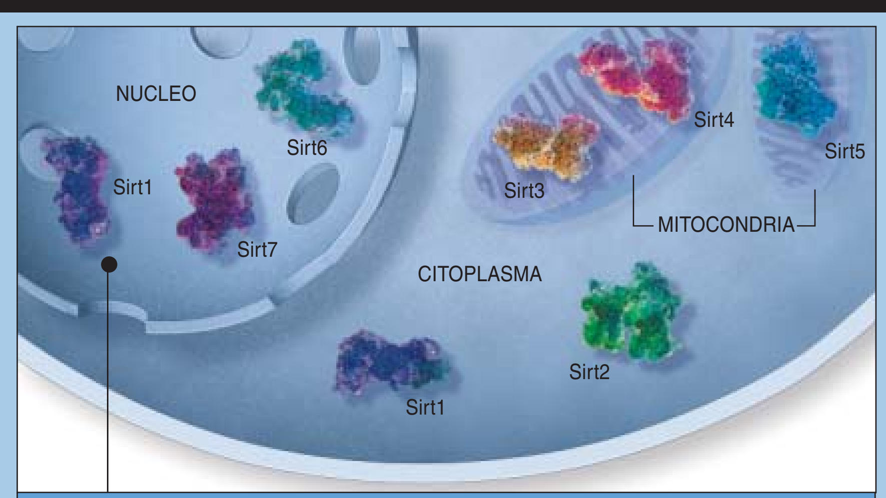
En un estudio más reciente de Christian Néri, del Instituto Nacional para la Salud y la Investigación Médica francés, se comprobó que el resveratrol y otro STAC, la fisetina, previenen la muerte de las células nerviosas en dos modelos animales de la enfermedad humana de Huntington. En ambos casos, gusano y ratón, la protección por parte del STAC requería la actividad del gen de la sirtuina.

Se va aclarando el efecto protector de las sirtuinas en las células. Pero si estos genes median los efectos beneficiosos de la restricción calórica, ¿cómo puede la dieta regular su actividad y, por tanto, el ritmo de envejecimiento en un organismo?

SIRTUINAS EN LA CELULA

La enzima Sirt1 es la sirtuina mejor caracterizada, aunque no la única hallada en mamíferos. Los genes relacionados con *SIRT1* dan lugar a enzimas similares que actúan en varios puntos del interior celular. Sirt1 opera en el núcleo y en el citoplasma: altera el comportamiento de otras proteínas mediante la desacetilación de las mismas. Muchos de sus blancos corresponden a factores de transcripción que activan directamente a genes o a reguladores de esos factores (*ejemplos, abajo a la derecha*); ello confiere a Sirt1 un control regulador sobre un amplio abanico de funciones celulares críticas.

Ha comenzado la identificación de la función de otras sirtuinas. Se empieza a determinar, además, su posible participación en la longevidad. Sirt2 modifica a la tubulina, un componente del andamiaje interno, y podría condicionar la división celular. Sirt3, que interviene en las mitocondrias, centrales energéticas de la célula, participa a buen seguro en la regulación de la temperatura corporal. Se desconocen las funciones de Sirt4 y Sirt5. Con el envejecimiento prematuro se han asociado ciertas mutaciones del gen que codifica a Sirt6.



ALGUNAS PROTEINAS BLANCO DE SIRT1

Fox01, Fox03 y Fox04: Factores de transcripción para genes implicados en las defensas celulares y el metabolismo de la glucosa

Histonas H3, H4 y H1: controlan el empaquetamiento del ADN en los cromosomas

Ku70: Factor de transcripción que promueve la reparación del ADN y la supervivencia celular

MyoD: Factor de transcripción que promueve el desarrollo muscular y la reparación de los tejidos

NCoR: Regulador que afecta a múltiples genes, incluidos los implicados en el metabolismo de los lípidos, la inflamación y la actividad de otros reguladores, como el PGC-1α

NF-κB: Factor de transcripción que controla la inflamación, la supervivencia de la célula y su crecimiento

P300: Reguladores que promueven la adición de marcas de acetilo a las histonas

P53: Factor de transcripción que dispara la muerte celular programada en las células dañadas

PGC-1α: Regulador que controla la respiración celular; parece desempeñar una función central en el desarrollo muscular

TAMI TOLPA

Una investigación reciente del equipo que dirige Pere Puigserver, de la Universidad Johns Hopkins, ha demostrado que los niveles de NAD aumentan en las células hepáticas bajo condiciones de ayuno, lo que provoca un incremento de la actividad de Sirt1. Entre las proteínas sobre las que actúa Sirt1 se encuentra un importante regulador de la transcripción génica, PGC-1α, que altera el metabolismo celular de la glucosa. Se confirma así que Sirt1 opera como un sensor de la disponibilidad de nutrientes y regulador de la respuesta del hígado.

Otras observaciones de parecido tenor han facilitado el avance de la hipótesis según la cual Sirt1 constituiría un regulador metabólico central en el hígado, el músculo y el tejido adiposo. Hay una razón poderosa: detecta variaciones en la dieta por medio de cambios en la relación NAD/NADH en el interior de las células y ejerce entonces efectos de largo alcance sobre el patrón de transcripción génica en aquellos tejidos. Este modelo explicaría que Sirt1 puede integrar un gran número de los genes y rutas que afectan a la longevidad descritos en el recuadro “Rutas génicas que prolongan la vida”.

La actividad de Sirt1 podría venir mediada por más de un mecanismo. De acuerdo con otra hipótesis atractiva, los mamíferos detectan su disponibilidad de alimento según la cantidad de energía que han almacenado en forma de grasa corporal. Los adipocitos segregan hormonas que llevan señales a otros tejidos, pero sus mensajes dependen del nivel de grasa almacenada. Al reducir los depósitos de grasa, la restricción calórica puede establecer un patrón de señales hormonales que comunica el mensaje “escasez”, detonante de las defensas celulares. Con esta idea resulta coherente el hecho siguiente: los ratones transgénicos que, con independencia de su ingesta de alimento, están programados para ser extraordinariamente delgados, tienden a vivir más.

Esta posibilidad llevó a preguntarnos si Sirt1, a su vez, regulaba también el almacenamiento de grasa en respuesta a la dieta. Cierto es que, ante la restricción de alimento, la actividad de Sirt1 aumenta en las células adiposas; ello provoca que las reservas adiposas se trasladen de las células al torrente sanguíneo para convertirse en energía en otros tejidos. Suponemos que Sirt1 detecta la dieta, dicta entonces el nivel de depósito de grasa y, por tanto, el patrón de hormonas producidas por los adipocitos. Este efecto sobre la grasa y las señales que envía establecerían, a su vez, el ritmo de envejecimiento del organismo y convertiría a Sirt1 en regulador clave

de la longevidad conferida por la restricción calórica en mamíferos. Establecería también una estrecha relación entre el envejecimiento y las enfermedades metabólicas, incluida la diabetes de tipo 2, que está asociada con un exceso de grasa. Una intervención farmacológica en la ruta de Sirt1 en los adipocitos podría, por tanto, prevenir no sólo el envejecimiento, sino también trastornos específicos.

Otro proceso crítico modificado por Sirt1 es la inflamación, que interviene en patologías diversas: cáncer, artritis, asma, trastornos cardíacos y neurodegeneración, entre otras. Un trabajo reciente del grupo que dirige Martin W. Mayo, de la Universidad de Virginia, ha demostrado que Sirt1 inhibe al NF-κB, un complejo proteínico que promueve la respuesta inflamatoria. El resveratrol, que activa a Sirt1, ejerce el mismo efecto. Este hallazgo resulta alentador para la búsqueda de inhibidores de NF-κB, un área muy activa de desarrollo de fármacos. Además, otro efecto bien conocido de la restricción calórica es la supresión de la inflamación excesiva.

Si *SIR2* constituye el controlador principal de un sistema de regulación para el envejecimiento que se activa por el estrés, quizás opera como un director de una orquesta integrada por redes hormonales, proteínas de regulación intracelular y otros genes asociados a la longevidad. Uno de los descubrimientos recientes más notables ha puesto de manifiesto que Sirt1 regula la producción de insulina y del factor de crecimiento 1 de tipo insulina (IGF-1). A su vez, esas dos poderosas moléculas de señalización parecen regular la síntesis de Sirt1 mediante un complejo circuito de retroalimentación.

La relación entre Sirt1, IGF-1 e insulina resulta fascinante, pues explica cómo la actividad de Sirt1 en un tejido podría comunicarse a otras células del cuerpo. Además, la concentración de insulina y de IGF-1 en sangre determina la longevidad en distintos organismos: gusanos, moscas, ratones y, posiblemente, humanos.

De la defensa al ataque

Teniendo en cuenta que el retraso del envejecimiento viene persiguiéndose, sin éxito, desde hace decenas de miles de años, a algunos les costará aceptar la posibilidad de controlar el proceso mediante manipulación génica. Pero se puede prevenir el envejecimiento en mamíferos con un simple cambio de dieta: la restricción calórica funciona. Hemos demostrado que los genes de sirtuinas controlan rutas moleculares domeñadas por la restricción calórica. Sin conocer las causas del envejecimiento, por millares quizá se cuenten, hemos comprobado en diversos organismos que la senescencia se retrasa mediante la manipulación de reguladores y permitiendo que éstos se hagan cargo de la salud del individuo.

Sabemos también que la familia de genes *SIR2* evolucionó en una fecha ya muy lejana, pues la encontramos en organismos enormemente distantes entre sí desde el punto de vista filogenético: levadura del pan, parásitos del género *Leishmania* y nemátodos, moscas y humanos. En todos estos organismos excepto en el último, que no se ha estudiado todavía, las sirtuinas determinan la esperanza de vida. Basta ese fenómeno exclusivo para convencernos de que los genes humanos de sirtuinas probablemente poseen la llave de nuestra salud y de nuestra longevidad.

En nuestros laboratorios se están desarrollando experimentos con ratones que habrán de revelarnos si el gen *SIRT1* controla la salud y la esperanza de vida en un mamífero. Pero tendrán que pasar decenios hasta conocer la incidencia de los genes de las sirtuinas en la longevidad humana. A medio plazo podríamos asistir a la aplicación de fármacos que modulan las sirtuinas en el tratamiento del Alzheimer, cáncer, diabetes y trastornos cardíacos. Varias de esas sustancias han empezado a someterse a ensayos para el tratamiento de la diabetes, herpes y enfermedades neurodegenerativas.

A largo plazo, desentrañados los secretos de los genes de la longevidad, esperamos avanzar en el tratamiento y la prevención de trastornos asociados al envejecimiento. Parece difícil imaginar cómo será sentirse joven y vivir relativamente libre de enfermedades hasta bien entrados los noventa años de edad. Algunos cuestionarán la bondad de la prolongación de la vida humana.

A principios del siglo XX, la esperanza de vida al nacer era de alrededor de 45 años; merced a los antibióticos y a medidas de salud pública para el combate de enfermedades infecciosas, la esperanza de vida ha aumentado hasta unos 75 años. La sociedad se ha adaptado a ese cambio; pocos querrían volver a la situación anterior. Para las generaciones futuras, acostumbradas a vivir más de 100 años, los métodos actuales para mejorar la salud no serán más que vestigios de una era ya pasada.

Los autores

David A. Sinclair y Lenny Guarente empezaron a colaborar en la investigación de los genes de la longevidad en 1995, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). En la actualidad, Sinclair dirige los laboratorios Paul F. Glenn de mecanismos biológicos del envejecimiento en la facultad de medicina de Harvard. Profesor de biología Novartis, Guarente ha pertenecido al cuerpo docente del MIT durante 25 años. Ambos estudian hoy la versión en mamíferos del gen *SIRT1*.

Bibliografía complementaria

AGELESS QUEST: ONE SCIENTIST'S SEARCH FOR GENES THAT PROLONG YOUTH. Leonard P. Guarente. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2002.

THE SECRETS OF AGING. Sophie L. Rovner en *Chemical & Engineering News*, vol. 82, n.º 34, págs. 30–35; 23 de agosto, 2004.

CALORIE RESTRICTION, SIRT1 AND METABOLISM: UNDERSTANDING LONGEVITY. Laura Bordone y Leonard Guarente en *Nature Reviews Molecular and Cell Biology*, vol. 6, págs. 298–305; abril 2005.

TOWARD A UNIFIED THEORY OF CALORIC RESTRICTION AND LONGEVITY REGULATION. David A. Sinclair en *Mechanisms of Ageing and Development*, vol. 126, n.º 9, págs. 987–1002; septiembre 2005.

Blindajes espaciales

Los rayos cósmicos representan un difícil obstáculo —si no insuperable— para los viajes tripulados a Marte o más allá

Eugene N. Parker

Asteroides a la deriva y otros cuerpos celestes amenazan a los viajeros espaciales en las películas. En la realidad, sin embargo, el verdadero peligro vendría de lo más diminuto: de las partículas elementales rápidas a las que se da el nombre de rayos cósmicos. En un viaje largo, inyectarían en los astronautas una dosis de radiación suficiente para provocarles un cáncer. A diferencia de otras dificultades de los viajes por el espacio profundo, para las cuales los ingenieros encontrarán soluciones con tiempo y dinero, de los rayos cósmicos no se puede escapar. Para protegerse de ellos hay que aceptar contrapartidas de tal magnitud, que quizás impidan los viajes tripulados a Marte.





1. LOS RAYOS COSMICOS romperían alrededor de una tercera parte del ADN de nuestro organismo en un año de viaje interplanetario. La protección de los astronautas obliga a compromisos inevitables.

PAT RAWLINGS/SAIC

En el laboratorio, los rayos cósmicos se manifestaron como una pequeña molestia. Se los descubrió al observarse que los cuerpos dotados de carga eléctrica no la conservaban, sino que la perdían a través del aire. Algo ionizaba el aire y le permitía conducir electricidad. Muchos lo atribuyeron a la radiactividad ambiental del suelo y de las rocas subterráneas. Victor Hess halló la verdadera razón en 1912. A bordo de un globo demostró que, cuanto más alto se subía, antes se descargaba un electroscopio. El origen del aire ionizado debía de ser algo misterioso que venía del espacio; de ahí el nombre de "rayos cósmicos".

A mediados del siglo pasado quedó claro que se trataba de una denominación inadecuada. Los rayos cósmicos no son rayos, sino iones —casi todos protones, con una pequeña mezcla de núcleos más pesados— que chocan contra la atmósfera exterior casi a la velocidad de la luz. La mayoría procede de fuera del sistema solar; se ignora el mecanismo que les imparte tal velocidad. Los físicos experimentales, que en un principio consideraban los rayos cósmicos un estorbo, hoy los utilizan como instrumento en sus observaciones. A partir de las variaciones en la intensidad de los rayos cósmicos, mis colaboradores y yo dedujimos a finales de los años cincuenta la existencia del viento solar.

Del embate de estos rayos no nos protege el campo magnético de la Tierra; tal defensa se la debemos al grosor de la atmósfera. Por encima de cada centímetro cuadrado de superficie hay un kilogramo de aire. Antes de que un protón incidente choque en el aire con el núcleo de un átomo, recorrerá en promedio una columna vertical de unos 70 gramos, alrededor de la decimocuarta parte del grosor de la atmósfera; la colisión, pues, se producirá a una altitud de entre unos 20 y unos 25 kilómetros. El resto de la atmósfera absorbe las esquirlas de esta primera colisión. El impacto arranca del núcleo un protón o neutrón, o dos; se inicia entonces una cascada de rayos gamma de alta energía y de mesones pi o piones. Cada rayo gamma penetra aún más en la atmósfera, hasta que produce un electrón y su antipartícula, el positrón. Estas dos partículas se aniquilan entre sí, con la creación de rayos gamma de menor energía; el ciclo continúa hasta que la radiación gamma, muy débil ya, se torna incapaz de crear más partículas.

Mientras tanto, los piones decaen en mesones mu, o muones, que atraviesan el aire hasta la superficie. Cuando cruzan nuestro cuerpo generan iones y rompen algunos enlaces químicos, si bien pocos; no nos provocan daños grandes. La dosis anual de radiación cósmica, unos 0,03 rem (depende de la altitud), equivale a un par de radiografías de tórax.

Fuera de la atmósfera, el bombardeo de rayos cósmicos es intenso y continuo. Un protón o núcleo pesado atravesaría una uña cada segundo, entre un total de 5000 iones que recorrerían nuestro cuerpo por segundo, cada uno de los cuales dejaría un reguero de enlaces químicos rotos y desencadenaría reacciones en cascada, como las atmosféricas. Aunque los núcleos pesados representan un pequeño porcentaje de los rayos cósmicos, son tan dañinos o más que los protones, dado que la capacidad de romper enlaces es proporcional al cuadrado de la carga eléctrica. Un núcleo de hierro, por ejemplo, causa 676 veces más estragos que un protón. La exposición a esta radiación durante una semana o un mes no tendría consecuencias graves, pero una excursión de dos años a Marte es otra historia. Según un cálculo de la NASA, los rayos cósmicos degradarían al año un tercio del ADN de un astronauta.

Blindaje

La única información cuantitativa disponible sobre las consecuencias biológicas de la radiación energética procede de los desafortunados que recibieron pulsos breves e intensos de rayos gamma y de partículas rápidas durante explosiones nucleares y accidentes de laboratorio. Han padecido daños celulares y una propensión mayor al cáncer. Un astronauta con destino a Marte estaría sometido a la misma dosis, si bien distribuida a lo largo de un tiempo mayor. No se sabe con certeza si las dos situaciones resultan equivalentes, pero la comparación resulta inquietante. Se ignora si los mecanismos biológicos para la reparación natural de las células lograrían restañar los desperfectos.

Wallace Friedberg, del Instituto Médico Civil Aeroespacial de la Administración Federal de Aviación, en Oklahoma City, y sus colaboradores han estudiado las consecuencias. Calculan que un astronauta recibiría en su viaje a Marte una dosis superior a 80 rem al año. Por comparar: el límite legal para los trabajadores de las centrales nucleares es en Estados Unidos cinco rem anuales. Uno de cada diez astronautas varones y una de cada seis mujeres astronautas (dada su mayor vulnerabilidad al cáncer de mama) morirían de cáncer con el tiempo. Los núcleos pesados les producirían además cataratas y daños cerebrales. (Estas cifras son provisionales.)

La persistente granizada de rayos cósmicos no es la única amenaza radiativa, por supuesto. También del Sol emanan brotes intensos de protones y núcleos más

Resumen/El peligro de los rayos cósmicos

- La galaxia está repleta de partículas celerísimas, que degradan el ADN y otras moléculas orgánicas. En la superficie de la Tierra, estamos protegidos de la radiación cósmica por la masa de aire sobre nuestras cabezas. El campo magnético terrestre actúa de escudo para los astronautas en las órbitas ecuatoriales. Pero la salud de quienes se alejaran de la Tierra correría peligro.
- Una cubierta esférica de agua o de plástico protegería a los viajeros espaciales; debería, sin embargo, pesar unas 400 toneladas, más de lo que pueden impulsar los cohetes más potentes. Un imán superconductor podría también repeler las partículas cósmicas. Aunque sólo pesaría nueve toneladas, seguiría siendo una tara excesiva; además, el propio campo magnético supondría un riesgo para la salud. Ninguna otra solución parece gozar de base sólida.
- Compete a la biomedicina determinar cuánto tiempo tolera una persona la exposición prolongada a los rayos cósmicos. Debe también averiguar si existen fármacos que estimulen los mecanismos naturales de reparación del organismo.

UN BAÑO DE RADIACION

Aunque no sería tan peligroso como entrar en un reactor nuclear, viajar por el espacio podría resultar muy perjudicial. Esta gráfica muestra una estimación de la dosis anual de radiación que los astronautas recibirían por parte de los rayos cósmicos. El rem es una unidad de medida de la radiación a que se está expuesto. Los astronautas interplanetarios absorberían más radiación en un año que los trabajadores de una central nuclear en toda su vida. Muchos padecerían cáncer y otras enfermedades. Las fulguraciones solares y la radiación del cinturón de Van Allen pueden ser inmediatamente letales, pero resulta más fácil evitarlas.

pesados que se desplazan próximos a la velocidad de la luz. Estos brotes liberan en ocasiones un exceso de radiación de un par de cientos de rem en una hora, dosis letal para un astronauta desprotegido. La gran fulguración solar del 23 de febrero de 1956 fue un ejemplo notable. Cualquier medida para proteger de los rayos cósmicos tiene también que aislar de las tormentas solares. Aun así, sería recomendable programar el viaje a Marte durante los años de mínima actividad magnética del Sol.

Conocedora de la existencia de las amenazas radiativas, la NASA inició en 2003 un programa de protección contra la radiación espacial en el Centro de Vuelos Espaciales Marshall de Huntsville, Alabama. Se pensó primero en blindar a los astronautas con un escudo de materia, como ocurre en la atmósfera terrestre. Una segunda propuesta quería desviar magnéticamente los rayos cósmicos, algo parecido a la protección parcial que el campo magnético de la Tierra les ofrece a las regiones ecuatoriales y a la Estación Espacial Internacional. En la propuesta más reciente se asigna una carga positiva a la nave espacial, para que repela los núcleos dotados de carga asimismo positiva.

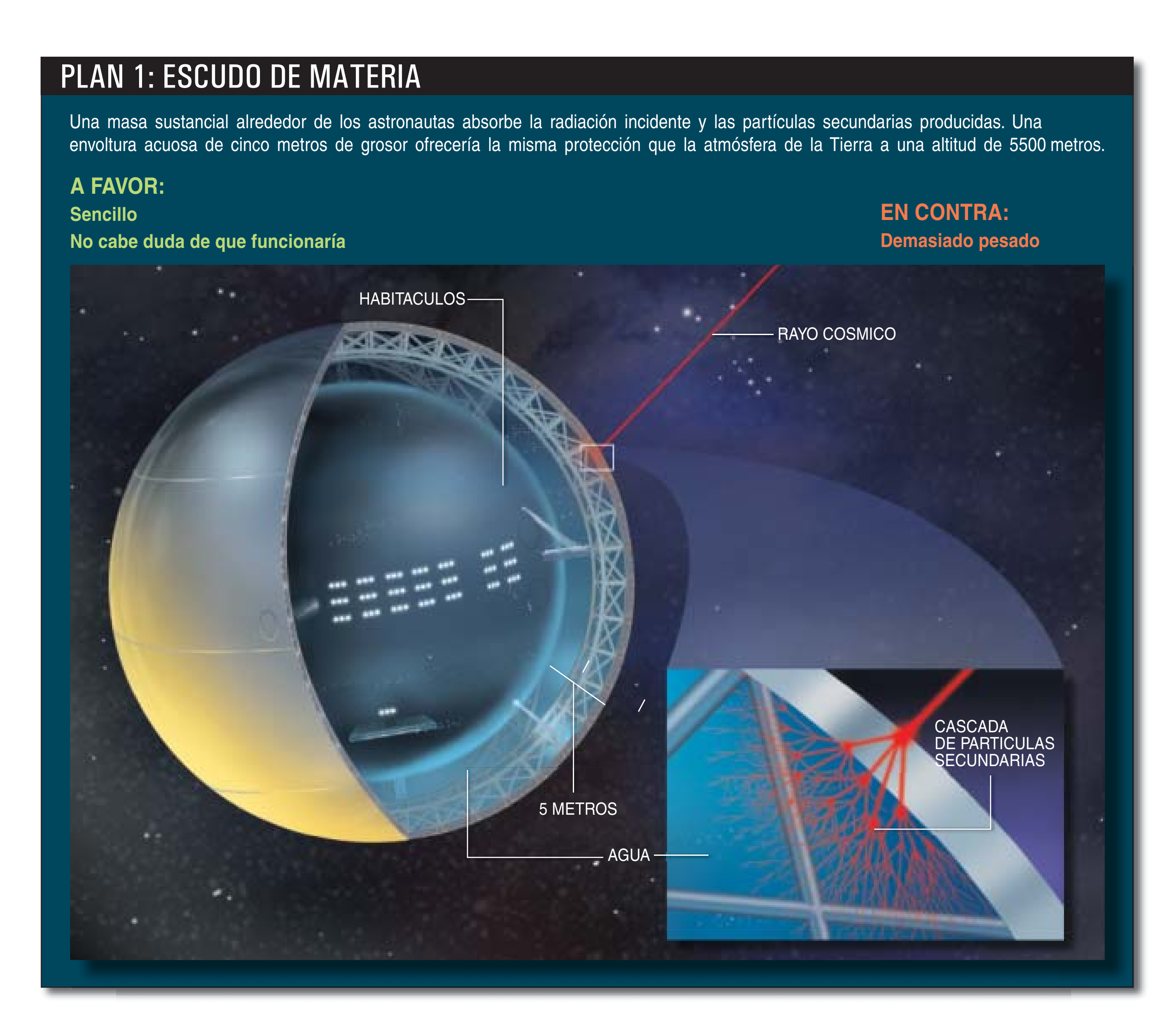
La NASA organizó un seminario en agosto de 2004, en la Universidad de Michigan en Ann Arbor, con el fin de evaluar los avances en este campo. Las conclusiones no fueron esperanzadoras. No se veía qué podría solucionar el problema de los rayos cósmicos. Ni tan siquiera cabía asegurar que hubiera una solución.

Campo de fuerza

Para igualar la protección ofrecida por la atmósfera terrestre se necesita un kilogramo de escudo por centímetro cuadrado, aunque a los astronautas les bastaría con 500 gramos, equivalente a la masa de aire sobre una altitud de 5500 metros. Menos sería ineficaz: el material que ejerce de pantalla no absorbería las partículas de la cascada de reacciones.

Si el material del escudo fuera agua, la profundidad debería ser de 5 metros. La masa de un tanque esférico con agua que encerrara una pequeña cápsula sería, pues, de 500 toneladas. Para contar con habitáculos cómodos en la nave haría falta aún más tonelaje. La lanzadera espacial transporta una carga máxima de 30 toneladas. Con frecuencia se ha propuesto el agua. Los astronautas la necesitarían de todas formas y además es rica en hidrógeno: los escudos hechos de elementos más pesados no resultan tan eficientes, ya que los protones y neutrones adicionales de los núcleos se ocultan unos a otros y limitan así su capacidad de interactuar con los rayos cósmicos incidentes. Para aumentar el contenido de hidrógeno, podría emplearse etileno (C_2H_4), que ofrece la ventaja de que, al polimerizarse, se convierte en polietileno, un sólido, y no requeriría, pues, un

KENT SNODGRASS



PLAN 1: ESCUDO DE MATERIA

Una masa sustancial alrededor de los astronautas absorbe la radiación incidente y las partículas secundarias producidas. Una envoltura acuosa de cinco metros de grosor ofrecería la misma protección que la atmósfera de la Tierra a una altitud de 5500 metros.

A FAVOR:
Sencillo
No cabe duda de que funcionaría

EN CONTRA:
Demasiado pesado

KENT SNODGRASS

tanque para encerrarlo. Con todo, la masa del conjunto alcanzaría las 400 toneladas: un peso inviable. El hidrógeno puro es bastante más ligero, pero necesita un contenedor de alta presurización.

Pensemos, pues, en los escudos magnéticos. Una partícula cargada que se desplaza por un campo magnético se desvía en ángulo recto con respecto a su movimiento. Dependiendo de la estructura de las líneas de campo, la partícula se desviará casi en cualquier dirección; podría incluso girar indefinidamente. Una partícula cargada que se acerque al campo magnético terrestre a bajas latitudes y con poca energía volverá al espacio. Una nave espacial que llevase un imán produciría ese mismo efecto.

Uno de los mayores problemas estriba en la altísima energía cinética de los protones de los rayos cósmicos. Una protección adecuada tendría que repeler los muchos protones cósmicos con dos mil millones de electronvolt (unidad típica de energía en la física de partículas). Para frenarlos en un espacio de pocos metros, se necesita un escudo con un campo magnético de 20 tesla, unas 600.000 veces la intensidad del campo magnético en el ecuador de la Tierra. Un campo tan intenso se genera con un electroimán dotado de cables superconductores, del estilo de los utilizados en los aceleradores de partículas. Samuel C. C. Ting, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, dirige un grupo de ingenieros que ha conseguido un sistema con una masa de sólo nueve toneladas. Se trata de un avance considerable con respecto al escudo material; no obstante, sigue resultando demasiado pesado para transportarlo durante todo el viaje de ida y vuelta a Marte.

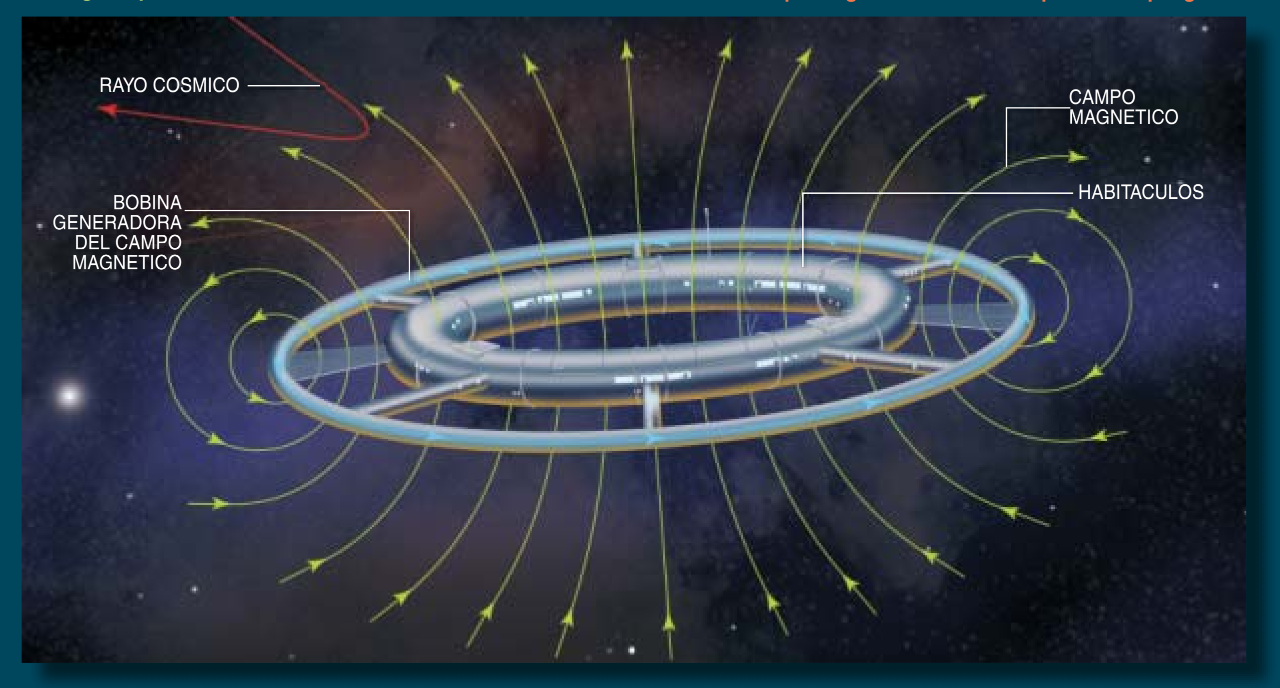
La solución magnética presenta, además, unas peculiaridades que deben tomarse en consideración. Los campos magnéticos no ofrecen un escudo cerca de los polos, donde las partículas incidentes llegan paralelas a las líneas de campo, no oblicuas ni perpendiculares. Por ello mismo, el campo magnético terrestre proporciona poca protección, excepto en las regiones ecuatoriales. Para defender a los astronautas, las zonas habitables de la nave espacial deberían tener forma de rosquilla. Los astronautas, en todo caso, estarían sometidos a campos magnéticos de 20 tesla. Se desconocen los efectos biológicos de esa exposición. John Marshall, físico experimental de la Universidad de Chicago, me comentó hace muchos años que introdujo la cabeza

PLAN 2: ESCUDO MAGNETICO

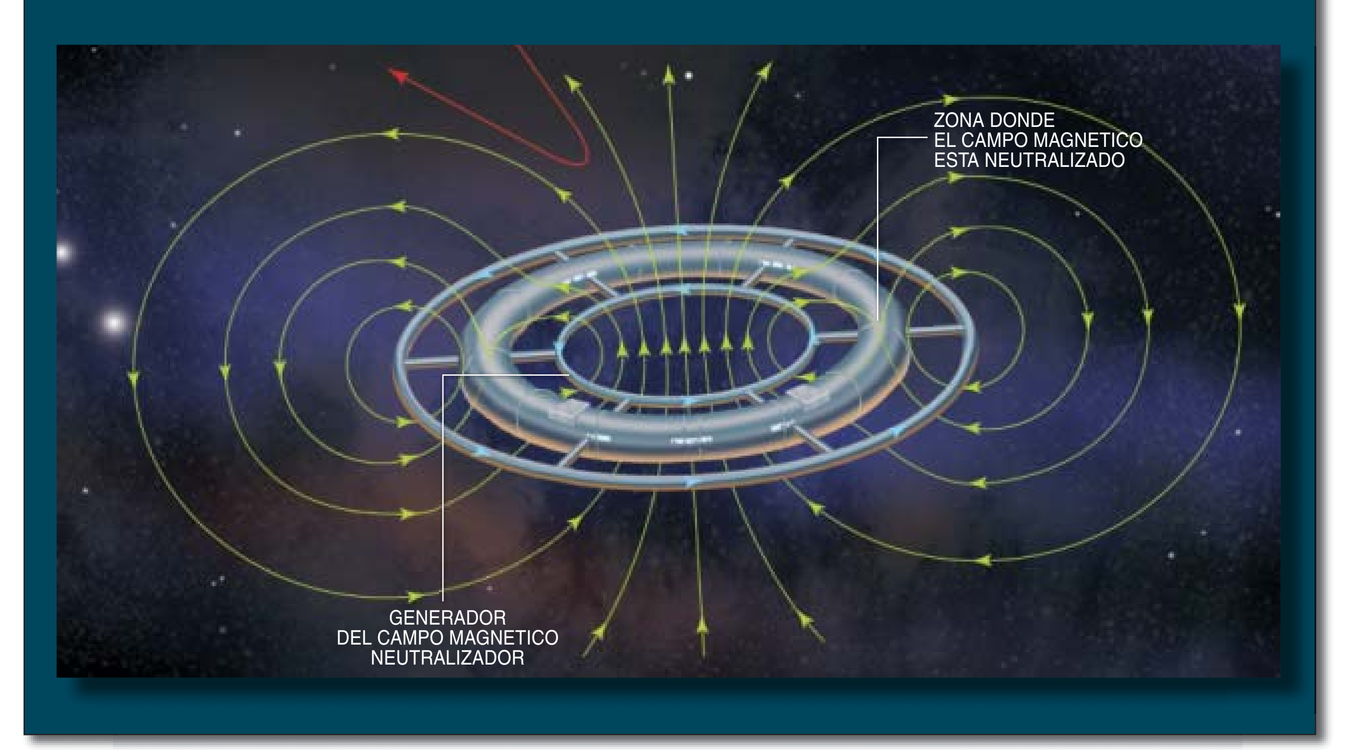
El electroimán devuelve las partículas incidentes al espacio. Para desviar el grueso de los rayos cósmicos, cuyas energías alcanzan los dos gigaelectronvolt, se necesita un campo magnético unas 600.000 veces más intenso que el campo ecuatorial de la Tierra.

A FAVOR:
Más ligero que el escudo de materia

EN CONTRA:
No hay protección a lo largo del eje
Un campo magnético tan intenso podría ser peligroso



Para suprimir el campo dentro de los habitáculos, la nave podría llevar un segundo anillo electromagnético. Pero la anulación sólo sería parcial y complicaría mucho el sistema.



KENT SNODGRASS

en el campo de 0,5 tesla del hueco entre polos de un imán de un viejo acelerador: en cuanto la movía, veía pequeños destellos de luz y sentía acidez en la boca, posiblemente por la electrolisis de la saliva.

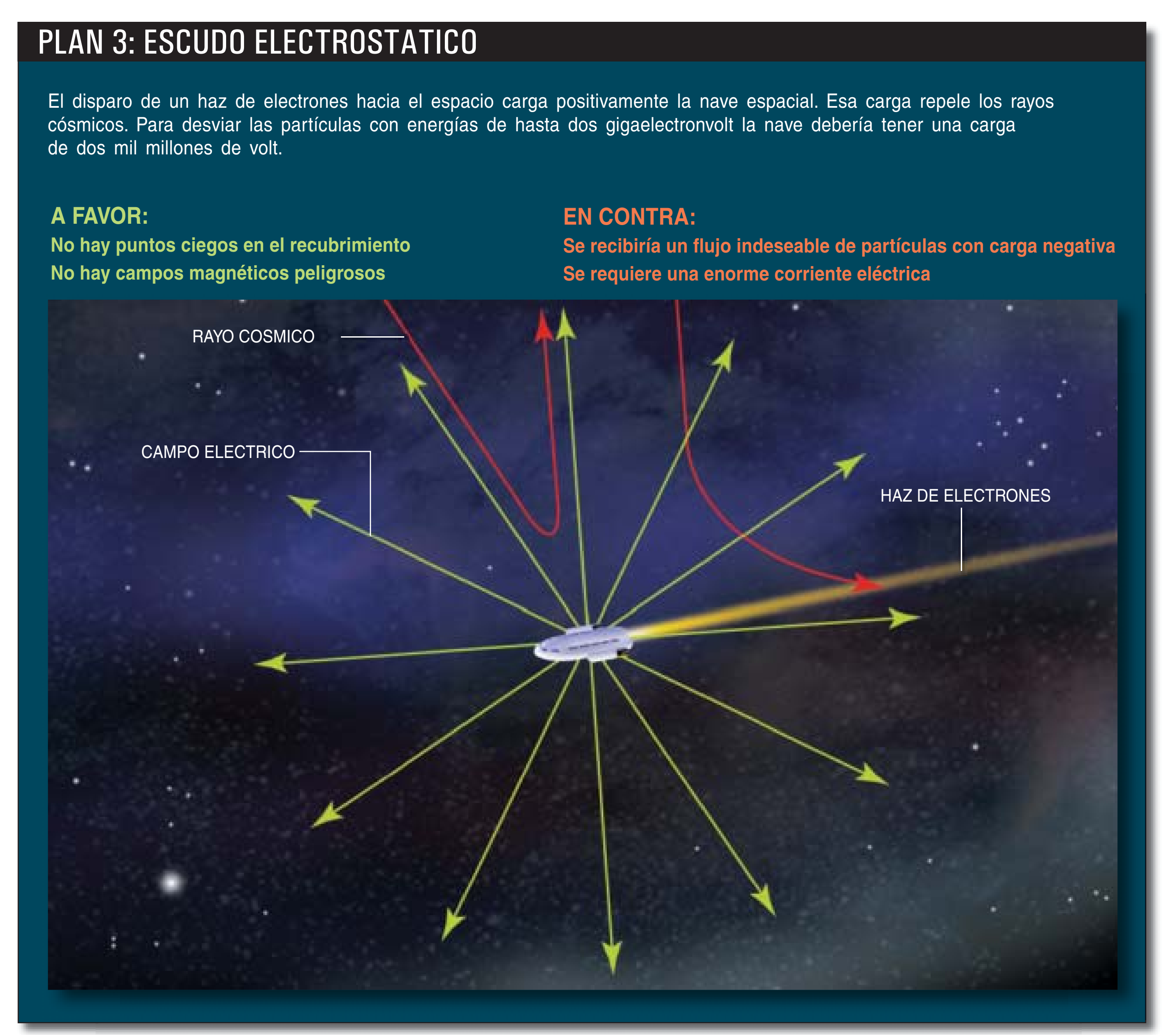
Dado que un campo intenso afecta a la química del organismo, hay que realizar más experimentos en el laboratorio para comprobar la seguridad de un escudo de 20 tesla. Si se confirmase su peligrosidad, se podría anular el campo en la zona habitable de la nave con la oposición de un electroimán. Pero un segundo imán complicaría el sistema y lo haría más pesado.

Se ha propuesto el uso de un campo que se extienda a una distancia de bastante más que unos pocos metros. Se conseguiría con un plasma, de modo parecido al transporte del campo magnético solar a distancias alejadas del Sol por el gas ionizado del viento solar. Los partidarios de esta propuesta sostienen que no se necesita un campo muy intenso para "inflar" el radio de acción; bastaría 1 tesla, o incluso menos. Mas se olvidan éstos de la inestabilidad de los plasmas. El empeño de los últimos 50 años por atrapar plasma en un campo magnético y producir así energía por fusión nuclear ha demostrado que el plasma no se deja controlar fácilmente. Y si se pudiera domeñarlo para que inflase el campo magnético, el escudo se debilitaría: las líneas de campo se extenderían radialmente y se dispersarían en una circunferencia mayor, por lo que un protón incidente tendría que atravesar un menor número de líneas de campo. Como resultado, el escudo perdería fuerza, tal y como ocurre en las latitudes intermedias y en las regiones polares de la Tierra.

Sin carga

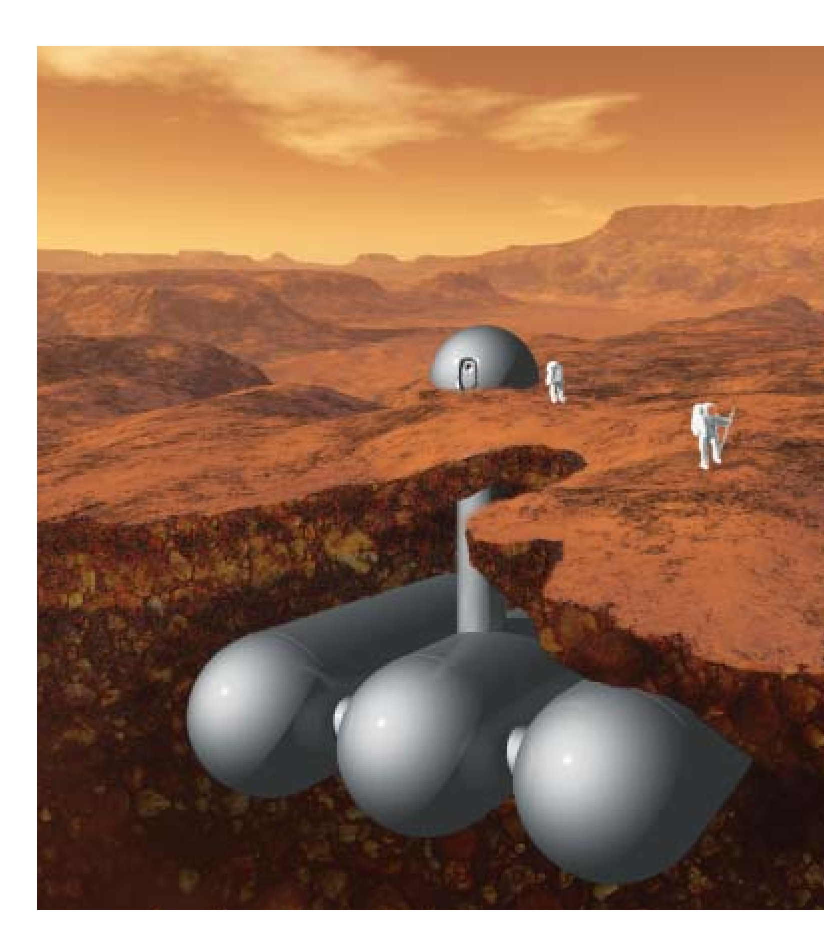
Otros han propuesto cargar eléctricamente la nave espacial. Si las paredes exteriores tuvieran un voltaje de dos mil millones de volt con respecto al espacio circundante, repelerían los protones cósmicos que alcanzaran energías de dos mil millones de electronvolt. Se ha avanzado una solución similar para la base lunar.

Los partidarios parecen desconocer que el espacio no está vacío. En las proximidades de la Tierra, el viento solar llena el espacio con unos cinco iones y cinco



KENT SNODGRASS

2. LA TENUE ATMOSFERA DE MARTE ofrece escasa protección contra los rayos cósmicos. Los astronautas tendrían que enterrar su base bajo toneladas de tierra y limitar sus salidas al exterior. La viabilidad de un asentamiento permanente depende de que la biomedicina cree medicamentos contra la radiación.



RON MILLER

electrones por centímetro cúbico. La nave espacial con carga positiva atraería esos electrones. El campo eléctrico actuaría hasta que su energía potencial cayese por debajo de la energía térmica de los electrones. Ocurriría a decenas de miles de kilómetros de la nave. Esta captaría los electrones de ese volumen inmenso. Los electrones golpearían sus paredes con una energía de dos mil millones de electronvolt, convertidos en "rayos cósmicos" de energía parecida a la de los protones que el sistema eléctrico querría repeler. Se reemplazaría el flujo natural de rayos cósmicos por otro artificial, mucho más intenso. Los electrones producen rayos gamma al chocar contra la nave; la intensidad del bombardeo dejaría pequeño el problema inicial.

Para mantener cargada la nave espacial se requeriría, además, una energía enorme. Una corriente de un ampère a dos mil millones de volt equivale a una potencia de 2000 megawatt: la producción de una buena central eléctrica. Unos cálculos rápidos indican que se necesitarían unos 10 millones de ampère. Los proponentes de la nave electrizada no han explicado cómo esperan cargarla con dos mil millones de volt. Resulta curioso que la idea, al igual que la de inflar con plasma los campos magnéticos, haya recibido una atención y unos fondos considerables, cuando ninguna de las dos cuenta siquiera con una explicación razonable de su posible funcionamiento.

Se han presentado también opciones más prosaicas. Cohetes mayores o técnicas de propulsión más avanzadas podrían acelerar el viaje y minimizar el tiempo de exposición de los astronautas. Pero la duración óptima de un viaje Tierra-Marte es más o menos una fracción fija del período orbital de los dos planetas; acortarlo requiere más combustible (y, por tanto, más dinero). En Marte, además, el problema no desaparece. La atmósfera marciana es muy liviana, de apenas 10 gramos por centímetro cuadrado. El soterramiento de una base bajo toneladas de tierra facilitaría la protección adecuada, pero habría que emplear maquinaria pesada.

Hoy por hoy, las ideas para proteger a los astronautas de los rayos cósmicos no resultan estimulantes. En su lado positivo, hemos de subrayar, sin embargo, que se hayan empezado a explorar los aspectos biomédicos. Los procesos curativos naturales de la célula quizá puedan absorber las dosis de radiación acumuladas durante un largo intervalo. Es previsible que los organismos de algunos reaccionen mejor que los de otros. De ser así, los cálculos actuales de la incidencia de cáncer, basados todos en brotes intensos y breves de radiación, estarían exagerando el peligro.

En el año 2003, la NASA creó el Laboratorio Nacional de Radiación Espacial, dependiente del Laboratorio Nacional de Brookhaven. Persigue determinar con precisión molecular los daños celulares, con el objetivo final de encontrar fármacos que los contrarresten. Investiga el impacto de la radiación en el ADN y qué tipo de daños se resisten a la terapia. Por ahora, no se conoce ningún producto químico que mejore la resistencia de las ratas de laboratorio a la radiación y no resulte tóxico.

Sería muy triste que la aventura de los viajes espaciales tripulados llegase a su fin por culpa de los rayos cósmicos.

El autor

Eugene N. Parker debe su fama a haber predicho y explicado en 1958 el viento solar, idea entonces difícil de aceptar: *The Astrophysical Journal* dudó en publicar el artículo donde exponía su hipótesis. Es profesor emérito de física en la Universidad de Chicago y miembro de la Academia Nacional de Ciencias.

Bibliografía complementaria

SHIELDING SPACE EXPLORERS FROM COSMIC RAYS. Eugene Parker en *Space Weather*, vol. 3, n.º 8, artículo núm. S08004, 19 de agosto, 2005.

Las ponencias de un congreso de la NASA celebrado en el año 2004 sobre escudos de radiación están disponibles en aoss.engin.umich.edu/Radiation

El sitio de la NASA sobre los escudos es www.radiationshielding.nasa.gov

Taenia solium: un parásito cosmopolita

La neurocisticercosis, infección del sistema nervioso central por la larva del parásito intestinal *Taenia solium*, es causa frecuente de convulsiones y epilepsia. Constituye un importante problema de salud en Iberoamérica, Africa y Asia

Ana Flisser, Laura Vargas-Parada y Juan Pedro Laclette

En julio de 1991 un hombre de 39 años, aquejado de crisis convulsivas, ingresaba en el servicio de urgencias de un hospital neoyorquino. El examen por resonancia magnética puso de manifiesto dos lesiones en el tejido cerebral. Para esclarecer el origen de las mismas, se le realizaron varios análisis clínicos. Se llegó entonces a un diagnóstico inesperado: neurocisticercosis, la enfermedad neurológica humana más importante causada por un parásito. Predominante en Iberoamérica, Africa y Asia, en los Estados Unidos se consideraba una infección bastante improbable. Las últimas reticencias se disiparon con la biopsia cerebral, que confirmó el diagnóstico.

De acuerdo con la propia etimología del término, se entiende por neurocisticercosis la infección del sistema nervioso central con el cisticerco, o forma larvaria de *Taenia solium*. Para llevar a cabo su ciclo biológico, ese platelminto necesita dos huéspedes: el hombre y el cerdo. El gusano adulto sólo habita en el intestino humano, donde genera miles de huevos. La infección se denomina teniosis.

De tamaño microscópico, los huevos se excretan con las heces. El cerdo, al ingerir heces que contengan proglótidos y huevos, se infecta. A esa condición se la conoce por cisticercosis porcina. El cerdo constituye el principal huésped de la forma larvaria del parásito.

El ciclo se completará cuando el hombre consuma carne de cerdo cruda o a medio cocer, infectada por cisticercos. La larva parasitaria se fija en la pared del intestino humano. Allí madura hasta convertirse en el gusano adulto. En ocasiones es el propio hombre el que, en un entorno poco higiénico, llega a ingerir los huevos. Se produce entonces la cisticercosis humana.

La sorpresa inicial del diagnóstico aumentó a medida que se fueron conociendo nuevos detalles. El paciente había nacido en la ciudad de Nueva York, en el seno de una comunidad judía ortodoxa. Exacto cumplidor del precepto religioso que le prohíbe el consumo de carne de cerdo, no había viajado a países donde la infección por *T. solium* es endémica. ¿Cómo podía alguien que no tiene contacto con cerdos y que no consume su carne desarrollar neurocisticercosis?

Se hicieron pruebas de diagnóstico inmunológico a cuatro miembros de la familia del paciente. Tres dieron positivo. Existía, pues, un contacto con el parásito. Aunque nunca se esclareció el caso, la explicación más plausible atribuye la adquisición de la infección a su trato con inmigrantes latinoamericanas que la familia había empleado en labores domésticas.

La mayoría de los portadores de la tenia adulta no presentan síntomas. Por eso suelen desconocer que están infectados con el parásito y las consecuencias que pueden derivarse.

1. *TAENIA SOLIUM*. Micrografía electrónica del escólex del parásito adulto en la cual se observa la doble corona de ganchos, el rostelo, y cuatro ventosas, que le permiten anclarse en la pared intestinal del huésped.

Una persona con teniosis libera intermitentemente un gran número de huevos en sus heces, con el riesgo consiguiente de infección para sí misma y su familia y, si cría cerdos, para sus animales.

Este parásito es endémico en Brasil, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Perú, India, China, Nueva Guinea, Africa del Sur, Africa Occidental, Madagascar y Zimbabwe. Pero con la emigración y el turismo se ha difundido su presencia en Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, Kuwait, Portugal, España y Australia. Se ha convertido incluso en enfermedad emergente en los Estados Unidos, donde la neurocisticercosis alcanza el 13,5 % de las consultas por convulsiones.

Anatomía de la tenia

En su forma adulta, la "solitaria" (nombre común que se le da a la tenia) presenta un cuerpo largo y aplanado cuya longitud puede superar los dos metros. Habita en el intestino delgado del hombre. Provista de un tegumento o epitelio que le permite absorber los nutrientes del medio, la tenia carece de un tubo digestivo



MARIA TERESA RABIELA



2. CICLO BIOLOGICO de *Taenia solium*. Alterna entre el ser humano como huésped definitivo y el cerdo como principal huésped intermediario. En su estado adulto, el platelminto habita en el intestino humano. Su presencia ocasiona la teniosis. La tenia, o solitaria, produce miles de huevos, que se expulsan con la excreta. El cerdo se infecta al ingerir heces donde hay huevos o segmentos del parásito adulto. Cada huevo puede convertirse en un cisticerco, forma larvaria del parásito. El cisticerco ocasiona la cisticercosis porcina. El ciclo culmina cuando el hombre consume carne de cerdo infectada con cisticercos y a medio cocer, lo que permite la supervivencia de los cisticercos. Estos se fijan en las paredes del intestino humano donde maduran hasta convertirse en gusanos adultos. La falta de higiene y la convivencia con un teniásico pueden ocasionar la ingestión de huevos, desarrollándose la cisticercosis humana.



interno, aunque desciende, desde un punto de vista evolutivo, de otros vermes aplanados que sí lo poseen.

A través del escólex se mantiene firme en el primer tercio del intestino delgado, pese al continuo movimiento de contracción o peristalsis intestinal. El escólex, del tamaño de una cabeza de alfiler, posee una doble corona de ganchos y cuatro ventosas; con los primeros se prende del intestino y con las segundas se adhiere a sus paredes.

El estróbilo, así se llama el cuerpo de la tenia, está segmentado. Los segmentos, o proglótidos, arrancan de una región germinal situada en la parte inferior del escólex. Los segmentos más cercanos al cuello son inmaduros, vale decir, sin órganos sexuales desarrollados; van mostrando un grado creciente de desarrollo y diferenciación a medida que se alejan del escólex, hasta aparecer segmentos maduros en la parte media del estróbilo.

Cada proglótido maduro posee órganos genitales masculinos y femeninos, que lo convierten en una auténtica unidad de reproducción: la tenia es un parásito hermafrodita. Los proglótidos más alejados del escólex muestran un útero "grávido" ramificado, lleno de huevos (~50.000 en cada uno). Cada proglótido mide entre 0,5 y 2 centímetros; los grávidos son liberados espontáneamente por la solitaria con las heces. Conforme se van expulsando proglótidos grávidos, van gestándose otros nuevos en el cuello.

De la oncosfera al cisticerco

En 1835, Karl Theodor Ernst von Siebold descubrió que los huevos de *Taenia*, esféricos y con apariencia radial cuando se observan a través del microscopio óptico, contienen una oncosfera, un embrión con seis ganchos pequeños. El microscopio electrónico permite contemplar las envolturas que protegen a la oncosfera; una de ellas, el embrióforo, constituye la principal defensa de los embriones para sobrevivir en el medio.

El embrióforo, formado por bloques de una proteína similar a la queratina, se caracteriza por una serie de propiedades contrastantes. Por un lado, es impermeable y muy resistente, lo que posibilita la supervivencia en un ambiente desfavorable; por otro, los bloques proteicos están unidos entre sí por una sustancia cementante sensible a la digestión enzimática. Así, cuando los huevos son ingeridos por el huésped intermediario, el embrióforo se desbarata de inmediato y libera las oncosferas.

Las mismas enzimas digestivas y sales biliares activan a las oncosferas. Atraviesan éstas la pared intestinal y entran en el torrente sanguíneo, hasta alcanzar y desarrollarse en el tejido subcutáneo, músculo esquelético, sistema nervioso central y ojos, convirtiéndose en la forma larvaria o cisticerco.

El cisticerco de *T. solium* es una vesícula ovalada y translúcida, llena de líquido, de 0,5 a 2 centímetros de diámetro mayor y dotada de un pequeño escólex en su interior. Al

igual que la tenia adulta, el escólex del cisticerco posee cuatro ventosas y dos hileras de ganchos.

Al carecer de tracto digestivo, las larvas obtienen sus nutrientes y excretan sus desechos a través de la superficie tegumental. El análisis del tegumento por microscopía electrónica nos ha revelado que, en congruencia con su función de absorción, la superficie externa aparece aumentada por microtricas, unas estructuras parecidas a las microvellosidades del intestino y otros epitelios de vertebrados e invertebrados. El tegumento, zona de contacto del parásito con el huésped, desempeña un papel central en el mantenimiento de su mutua relación.

Cuando el hombre consume carne de cerdo a medio cocer e infectada por cisticercos, el parásito culmina su ciclo biológico. De nuevo, las enzimas proteolíticas y las sales biliares inducen al cisticerco a salir de la vesícula a través de un proceso de evaginación y anclarse en el epitelio intestinal para iniciar su transformación en el gusano adulto o solitaria. Tres o cuatro meses más tarde, la solitaria comienza a expulsar proglótidos grávidos.

Un parásito, dos enfermedades

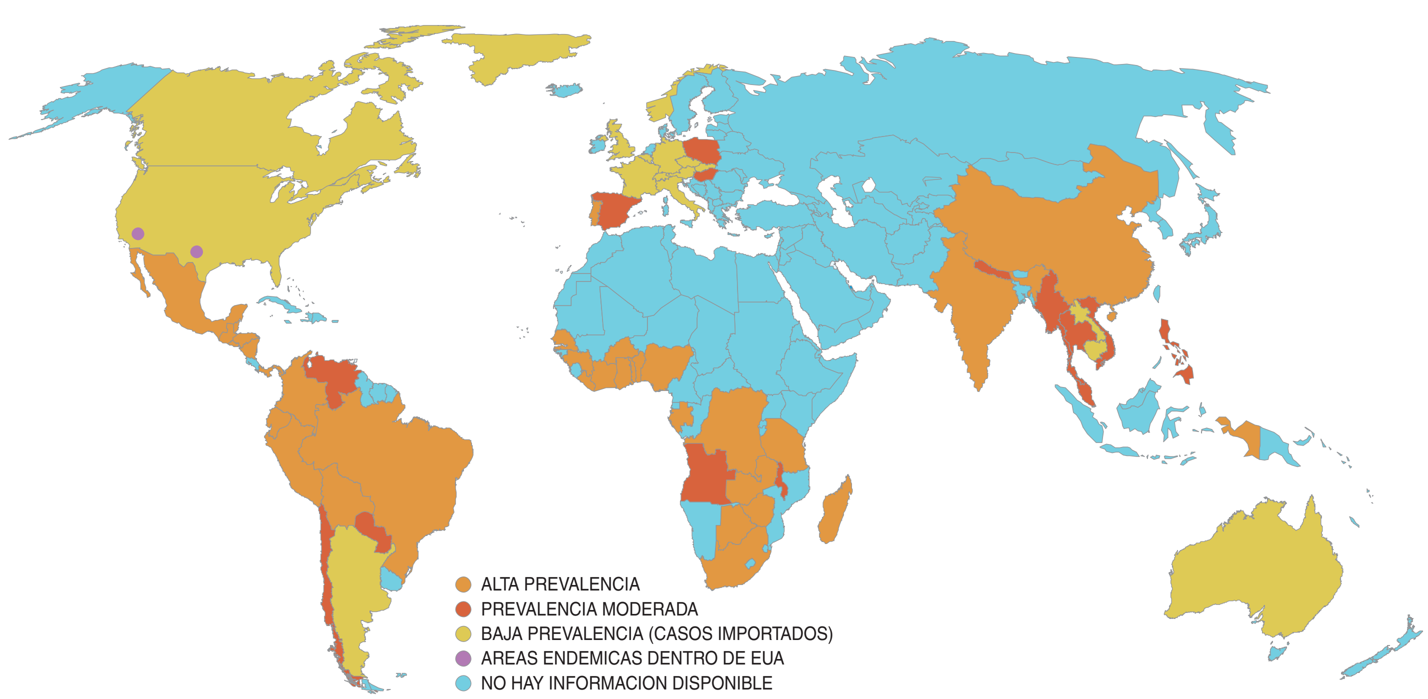
La teniosis humana se conoce desde la antigüedad. Hipócrates, Aristóteles y Teofrasto llamaron platelmintos a los gusanos responsables, por su parecido con cintas o listones, que Celso y Plinio el Viejo vertieron al latín con la expresión "lumbricus latus", gusano ancho. La medicina árabe, con Serapión a la cabeza, creía que cada proglótido era un gusano diferente. Los musulmanes le impusieron el nombre de "cucurbitineos", no sólo por su parecido con las semillas de la calabaza, sino también porque éstas constituyeron uno de los remedios más antiguos contra la teniosis, todavía en uso. Se atribuye a Arnau de Vilanova, a comienzos del siglo XIV, la primera descripción de la especie. Recogía el viejo error de que sólo había un parásito por persona. (Aunque muchos individuos se encuentran infectados con un solo gusano, se dan también infecciones múltiples.) Varios siglos más fueron necesarios para comprender la anatomía completa de la tenia. Carlos Linneo incluyó la especie *Taenia solium* en la décima edición de su *Systema Naturae* (1758).

Los griegos supieron ya de la existencia de la cisticercosis porcina, aunque se les escapó su naturaleza. La primera referencia a un caso de cisticercosis humana se la debemos a Johannes Udalric Rumler en 1558, quien la atribuyó a un tumor en la duramadre de un epiléptico. Domenico Panarolus en 1652 observó quistes parecidos en el cuerpo calloso del cerebro de otro epiléptico. Pero no se aludiría a su carácter parasitario hasta 1697, cuando Marcello Malpighi descubrió el origen animal de estos quistes y describió el escólex.

En 1784, Johann August Ephraim Goeze, ajeno al trabajo de Malpighi, volvió a examinar a los cisticercos de cerdo e identificó su naturaleza helmíntica. Dos años después, P. C. Werner redescubrió la cisticercosis humana en la autopsia de un soldado; halló dos quistes en el músculo pectoral que le recordaban los observados en la cisticercosis porcina.

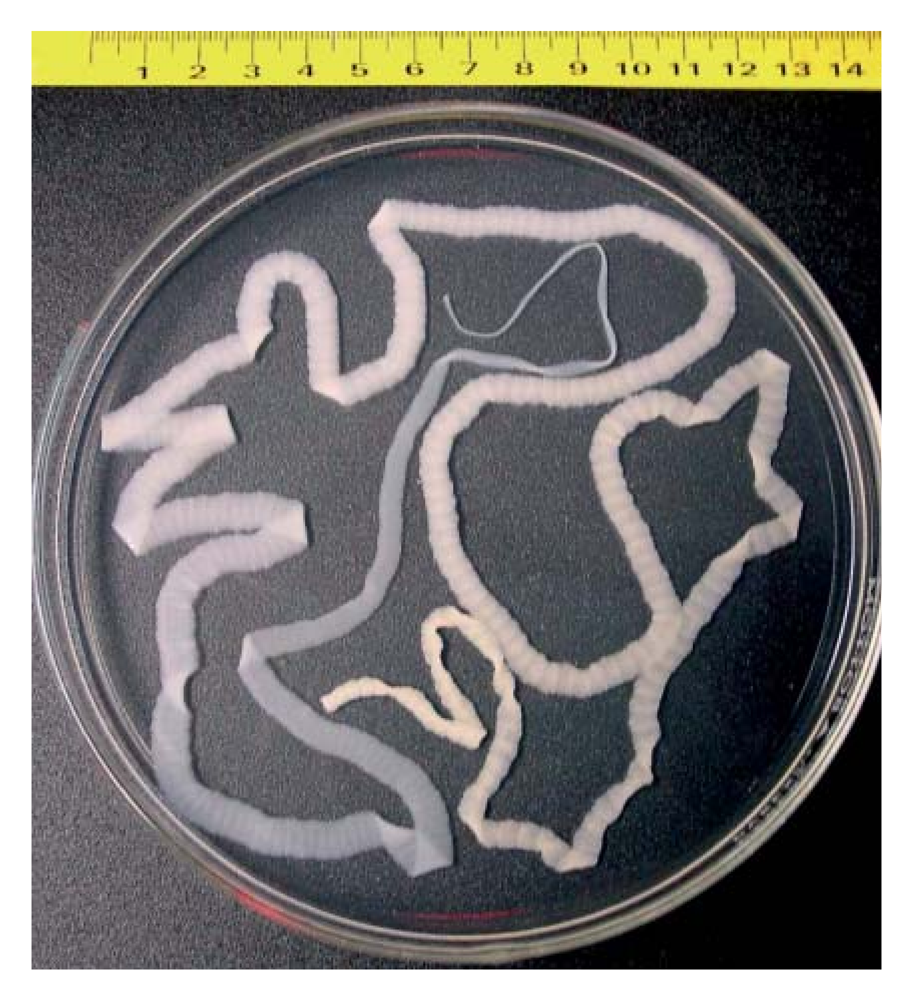
A finales del siglo XVIII se conocían ya la teniosis y la cisticercosis. Pero, al ignorarse el ciclo biológico del parásito, no se las asoció. Un primer paso se dio con el descubrimiento de los huevos de platelmintos. Algunos se plantearon entonces la formación del gusano adulto. Goeze en 1784 y Felix Dujardin en 1845 notaron similitudes en la forma del escólex del gusano adulto con el del cisticerco y sospecharon de una conexión entre ambos.

El desarrollo de cisticercos en cerdos quedó demostrado en 1853,



ANA VINIEGRA

3. DISTRIBUCION MUNDIAL DE LA CISTICERCOSIS. Predominante en Iberoamérica, Africa y Asia, en los últimos años ha aumentado el número de casos identificados en otras regiones, lo que convierte a la cisticercosis en una patología emergente y global. Datos de 2003 suministrados por la Organización Mundial de la Salud.



4. UN GUSANO PLANO. En estado adulto, la solitaria (*Taenia solium*) puede medir de dos a siete metros. Se trata de un invertebrado segmentado; los segmentos, o proglótidos, cuando están grávidos y por ende llenos de huevos, se expulsan con la materia fecal. La longitud de un proglótido viene a ser de medio centímetro.

ADRIANA GARZA RODRIGUEZ

cuando Pierre-Joseph Van Beneden alimentó a un cerdo con huevos de *T. solium* y encontró cisticercos en los músculos durante la necropsia. Van Beneden utilizó como animal control a otro cerdo que mantuvo en las mismas condiciones, aunque sin darle huevos; en éste no halló ningún cisticerco.

Dos años después, en un estudio controvertido, Friedrich Kuchenmeister demostró que las tenias se desarrollaban a partir de cisticercos. En su ensayo, introdujo cisticercos en la dieta de un condenado a la pena capital, sin su conocimiento. En la necropsia subsiguiente a la ejecución observó tenias en el intestino. En diciembre de 1854, Aloys Humbert se autoinfectó ingiriendo 13 cisticercos; hacia marzo del año siguiente comenzó a expulsar segmentos de *T. solium*. En 1933, K. Yoshino se propuso experimentar en sí mismo el curso de la infección. Comenzó por ingerir cisticercos. Durante dos años fue describiendo la expulsión de proglótidos. Yoshino se convirtió en su propio proveedor de huevos y llevó a cabo diversos estudios sobre el desarrollo de los cisticercos en cerdos.

El signo más característico de la infección con el gusano adulto ha sido la liberación de proglótidos en las heces. Se consideran también síntomas de teniosis el malestar abdominal, flatulencia, pérdida de peso y otras afecciones gastrointestinales. Con todo, la investigación de campo revela que los pacientes con teniosis suelen mostrarse asintomáticos; no llegan a la mitad los que afirman haber pasado proglótidos con las deposiciones.

Un episodio registrado en 1934 permitió establecer el tiempo de aparición de los síntomas neurológicos de la enfermedad. En ese año soldados británicos destacados en la India regresaron a su país. A algunos de estos soldados se les diagnosticó neurocisticercosis, por lo que fueron sometidos a un estricto seguimiento médico. Las crisis convulsivas, principal síntoma, tardaron, en promedio, dos años en manifestarse, aunque hubo casos en que la epilepsia no sobrevino hasta 20 o más años desde su regreso. La sintomatología se asoció con la muerte de los cisticercos. Se definieron entonces dos aspectos importantes de la enfermedad: su duración y su permanencia en el individuo por varios años sin ocasionar síntomas neurológicos.

En el hombre, los cisticercos se desarrollan en el sistema nervioso central, el ojo, el músculo esquelético y el tejido subcutáneo. Por su gravedad destacan la neurocisticercosis y la cisticercosis ocular. La neurocisticercosis constituye una enfermedad compleja, cuyos síntomas dependen, en buena medida, del número y localización de los parásitos en el sistema nervioso central y las meninges, así como del grado de la reacción inflamatoria inducida por el parásito y las condiciones del huésped.

Los cisticercos del parénquima cerebral generan crisis convulsivas en el 70 % de los pacientes con neurocisticercosis. En los países donde la enfermedad es prevalente, uno de cada dos casos de epilepsia se debe a neurocisticercosis. El aumento de la presión intracraneal es otra de las complicaciones frecuentes. Se dan también alteraciones del estado mental. En Iberoamérica la tasa de neurocisticercosis supera la de cisticercosis muscular y subcutánea; en los países asiáticos predomina la cisticercosis muscular diseminada.

Diagnóstico y tratamiento

Debemos a Ignacio Gómez Izquierdo el primer informe realizado en México sobre cisticercosis humana. Publicado en 1901 describía el caso de una paciente de Cuba muerta en un asilo psiquiátrico. La autopsia mostró la presencia de múltiples cisticercos. Las dudas manifestadas por el autor reflejan el estado de la cuestión a principios del siglo XX: “El diagnós-

tico es casi imposible, porque, con la excepción de los casos en donde los cisticercos están en el tejido superficial o en el ojo, la sintomatología por sí sola no provee suficiente información. Y si el diagnóstico se hubiera hecho con precisión, ¿dejaría de ser fatal? ¿Existen tratamientos médicos o quirúrgicos que permitan luchar con éxito contra esta enfermedad? Nuestra respuesta, tristemente, es negativa". Actualmente, el diagnóstico es muy fiable y el tratamiento medicamentoso, eficaz.

Disponemos hoy de dos tipos diferentes de técnicas de apoyo diagnóstico de la neurocisticercosis: las de imagen (tomografía computerizada y resonancia magnética) y las inmunitarias. Tomografía computerizada y resonancia magnética permiten definir el número, estadio, localización y extensión de las lesiones cerebrales. En el espacio subaracnoideo o en los ventrículos pueden alojarse cisticercos grandes. Al aplicar un medio de contraste, se aprecia un anillo blanco, que indica la presencia de un proceso inflamatorio en torno al parásito. Se observan también calcificaciones redondas o imágenes mixtas.

El inmunodiagnóstico es un procedimiento de bajo costo comparado con los estudios de imagen. Para detectar anticuerpos en los análisis clínicos se recurre a la técnica de inmunoelectrotransferencia ("western blot"). Esta técnica tiene alta especificidad y sensibilidad, pero es costosa. Los resultados positivos se presentan cuando el suero reacciona con proteínas ricas en azúcares, específicas del parásito.

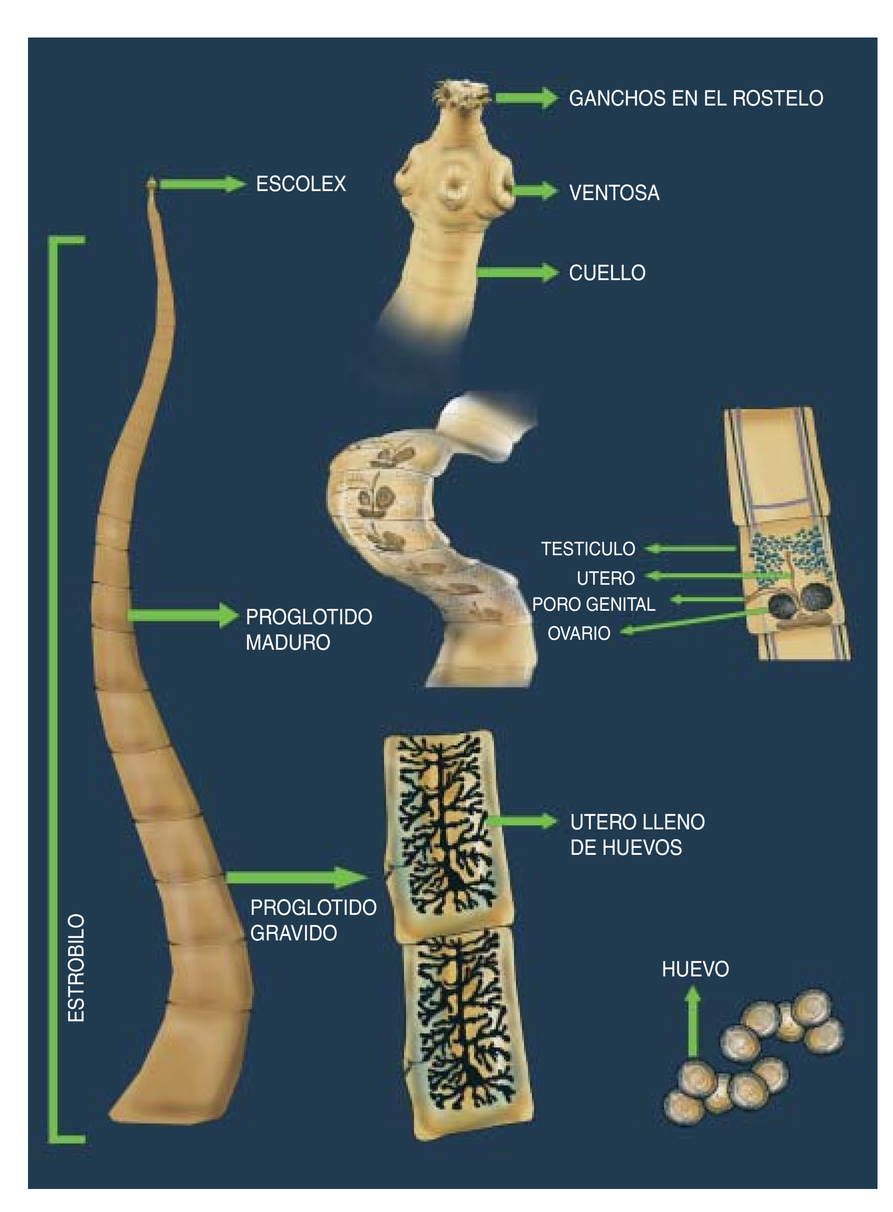
Puede recurrirse a otro procedimiento inmunitario, el ELISA (acrónimo de "enzyme linked immunosorbent assay"). Ahora bien, puesto que lo único que se detecta es la presencia de anticuerpos anticisticerco, ambas pruebas inmunitarias indican sólo si se ha estado en contacto con el parásito, pero no permiten distinguir entre una infección activa y una resuelta.

Para identificar una infección activa, precisamos establecer la presencia de antígenos del parásito. Los antígenos son sustancias o moléculas características del agente invasor (en este caso *T. solium*), que el sistema inmunitario reconoce como extraños.

El ELISA, estandarizado por Dolores Correa y su grupo para captura de antígenos del cisticerco circulantes, ha llegado a resultados en correlación con los hallazgos tomográficos. Sin embargo, los antígenos se degradan en poco tiempo en el suero, por lo que la sensibilidad de la técnica es baja.

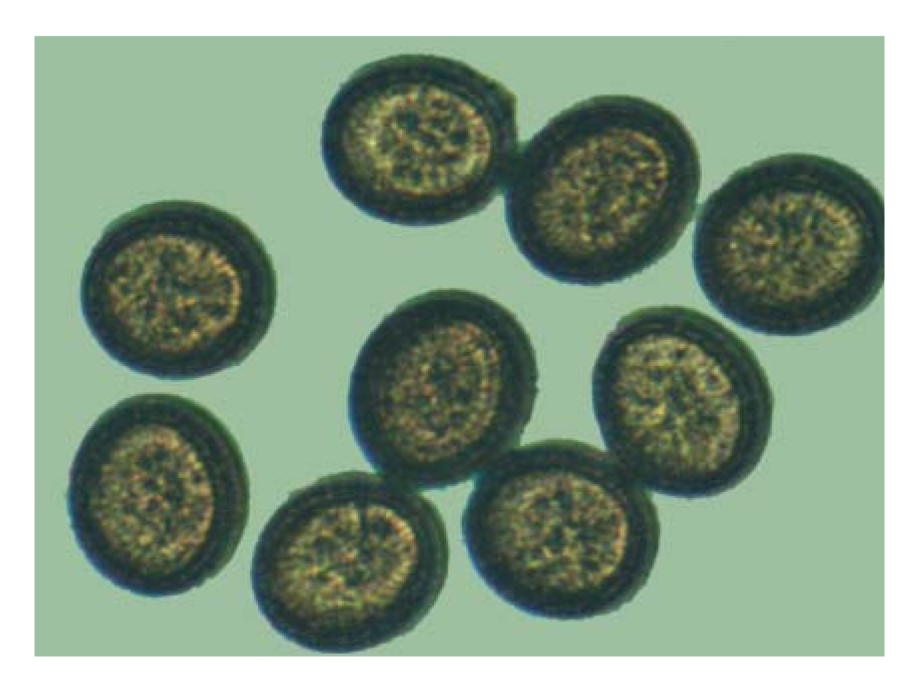
La cisticercosis ocular es de fácil diagnóstico cuando los cisticercos están vivos o son reconocibles. No así cuando, por culpa de la reacción inflamatoria o de la lenta destrucción del parásito, éstos pierden su forma característica. A menudo, pasa inadvertida la presencia de cisticercos en el músculo y en el tejido subcutáneo.

En el tratamiento de la neurocisticercosis se produjo un punto de inflexión en 1975, limitado hasta entonces a la extirpación quirúrgica del parásito, no siempre posible, o la colocación de una válvula para desviar la circulación del líquido cefalorraquídeo hacia el tórax o el abdomen, cuando un cisticerco obstruía su circulación. Aparecieron medicamentos que atacan y matan al cisti-



5. ANATOMIA DEL PLATELMINTO. El cuerpo del gusano recibe el nombre de estróbilo. Está formado por proglótidos que se originan en el cuello, o región germinal. *Taenia solium* es un parásito hermafrodita. Los proglótidos maduros contienen órganos sexuales masculinos y femeninos. Los proglótidos más alejados del escólex son grávidos y se encuentran repletos de huevos.

ANA VINIEGRA



6. HUEVOS DE TENIA. De forma esférica, miden entre 30 y 45 micrometros. Observados a través del microscopio óptico ofrecen una apariencia radial. En su interior se encuentra la oncosfera, un embrión con seis ganchos pequeños.

cerco. En particular, el prazicuantel y el albendazol se recomiendan para el tratamiento de parásitos del sistema nervioso central (parénquima y espacio subaracnoideo), subcutáneos y musculares. Para el tratamiento de enfermos que sólo tienen crisis convulsivas y presentan parásitos calcificados, inertes, se aconsejan las medicinas antiepilépticas.

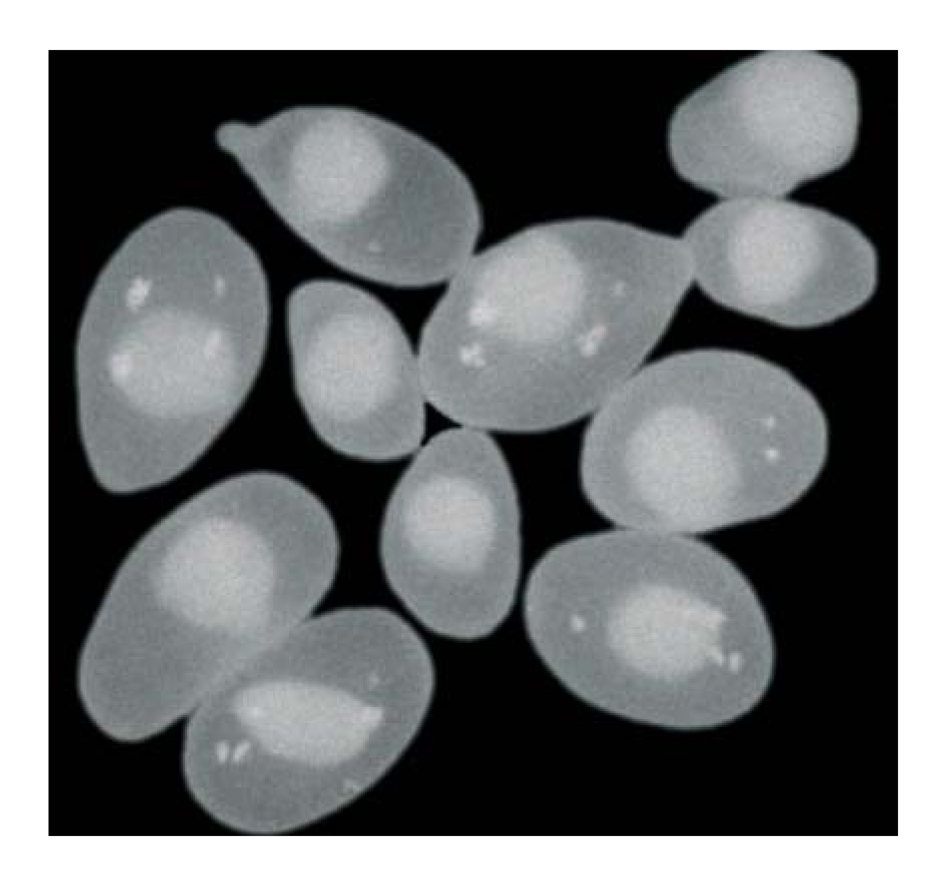
Respuesta humoral y celular

Ante la invasión parasitaria, el cuerpo reacciona con una doble respuesta inmunitaria: humoral y celular. La humoral se caracteriza por la presencia de anticuerpos, proteínas que se unen a su antígeno correspondiente. De la respuesta celular se encargan los leucocitos.

Se han detectado inmunoglobulinas IgG contra los cisticercos en el suero sanguíneo y en el líquido cefalorraquídeo. Uno de los autores (Flisser) demostró también su presencia en la saliva de enfermos con neurocisticercosis. La presencia de IgG, que es el anticuerpo más longevo, corrobora que la enfermedad constituye un proceso crónico y de larga evolución. Esta respuesta inmunitaria humoral opera con mayor intensidad en casos sintomáticos que en población abierta. Existe, además, una correlación verosímil entre anticuerpos del huésped y características de los parásitos: los anticuerpos abundan en pacientes cuyos cisticercos están vivos o en proceso de destrucción, para disminuir en presencia de parásitos calcificados.

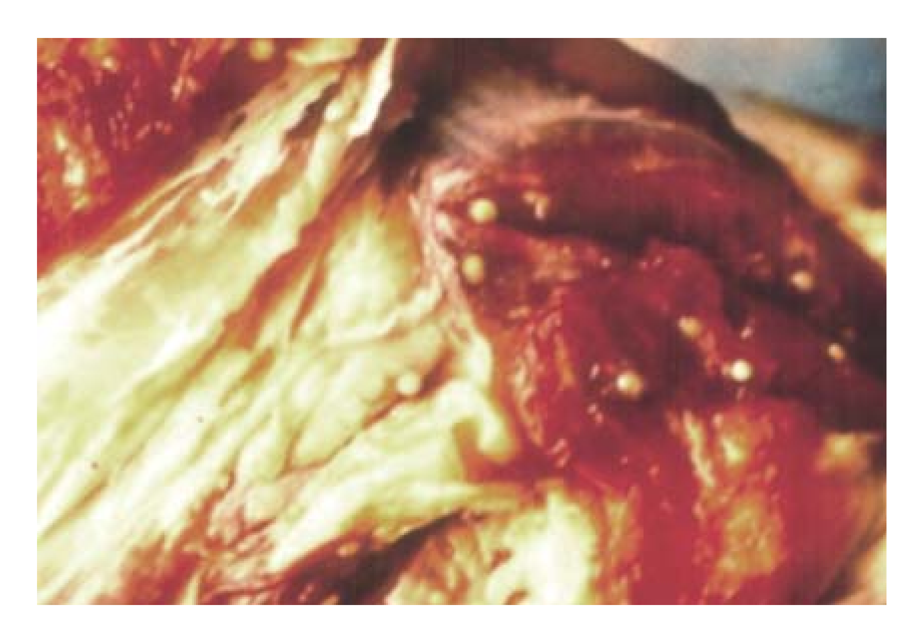
Queda mucho por ahondar en el conocimiento de la respuesta inmunitaria celular ante la neurocisticercosis. Los linfocitos T, principales actores de la respuesta celular y encargados de la destrucción de agentes patógenos, son de dos tipos: T coadyuvantes (Th), subdivididos a su vez en Th1 y Th2, y linfocitos T citotóxicos (Tc). La proporción entre ambos tipos de linfocitos está asociada con la funcionalidad del sistema inmunitario, una proporción que parece anormal en los pacientes con cisticercosis: se da un aumento en la subpoblación de células citotóxicas que sugiere una respuesta inmunitaria disminuida. Sin embargo, aún no se sabe si la parasitosis es la causa o el efecto de la inmunodepresión.

Se han detectado citocinas, moléculas de comunicación entre células, lo mismo en el líquido cefalorraquídeo que en la sangre de pacientes



7. CISTICERCO, o forma larvaria del parásito. A través del microscopio óptico se distingue una vesícula translúcida y llena de líquido que contiene un escólex invaginado. Cada cisticerco mide de medio centímetro a dos centímetros.

ADRIANA GARZA RODRIGUEZ (*arriba*); DAYANA RODRIGUEZ (*abajo*)



8. EN LA CARNE DE UN CERDO con cisticercosis llaman la atención las vesículas con el escólex (*blanco*) en su interior, indicio de que la larva se halla viva.

con neurocisticercosis. Las citoquinas reflejan una respuesta inmunitaria de tipo Th1 (asociadas a protección). No obstante, la reacción inflamatoria crónica que rodea a cisticercos en el cerebro sugiere la participación tanto de linfocitos Th1 como Th2, estos últimos relacionados con una respuesta inmunitaria deficiente, es decir, permisiva de la infección.

A partir de estudios de autopsias de pacientes con neurocisticercosis, María Teresa Rabiela, del Instituto Mexicano del Seguro Social, Alfonso Escobar, del Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, y Juan Olvera, del Hospital General de México, aportaron varias descripciones de la reacción inflamatoria que rodea a los parásitos. También existen descripciones detalladas de las células inflamatorias que rodean a los cisticercos obtenidos de cerdos jóvenes y viejos, antes y después de tratamiento cestocida y después de vacunación, realizadas por Aline Aluja, de la facultad de medicina veterinaria y zootecnia de la UNAM. De acuerdo con los resultados obtenidos por esos investigadores, alrededor de los cisticercos viables prácticamente no existe contacto físico entre huésped y parásito, ni suele darse una inflamación circundante.

Cuando los parásitos comienzan a morir, ya sea de manera natural o por la acción bioquímica de los fármacos o la vacunación, se inicia un proceso inflamatorio con la intervención de eosinófilos, una clase de leucocitos, cúmulos de linfocitos y macrófagos en fagocitosis en el interior de los cisticercos destruidos.

Para sobrevivir a una respuesta inmunitaria activa, el parásito desarrolla diversos mecanismos de evasión y depresión de la respuesta inmunitaria: establecimiento en sitios inmunológicamente privilegiados, como el ojo y el cerebro; enmascaramiento de la respuesta inmunitaria, al cubrirse con anticuerpos del huésped; producción de moléculas que suprimen o desvían la respuesta inmunitaria, y procesos de mutagénesis.

¿Dónde está, a qué se debe y cómo se controla?

Está firmemente arraigada la opinión de que la enfermedad puede adquirirse a través del consumo de vegetales y frutas irrigadas con aguas negras. En 1986 uno de nosotros (Flisser) publicó la frecuencia de teniosis en enfermos con neurocisticercosis y en sus familiares, así como en un grupo control del mismo estrato socioeconómico, exento de la infección. Llegó a la conclusión de que el principal factor de riesgo para contraer cisticercosis era la presencia de un portador de la tenia en casa.

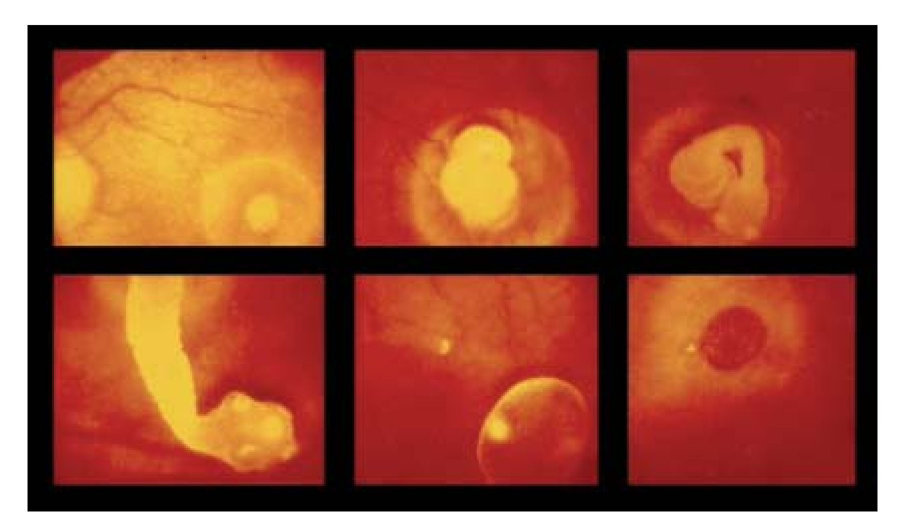
El grupo de Flisser, en colaboración con Peter Schantz, de los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC) de Atlanta, acometieron varios estudios epidemiológicos en México. El primero, realizado en una comunidad pequeña del estado de Hidalgo, confirmó, en población abierta, que la presencia de un portador de tenia intestinal en casa era el principal factor de riesgo asociado a cisticercosis. Lo confirmaron otros trabajos en diversas comunidades rurales y en una urbana. Otros factores de riesgo identificados fue la presencia de cerdos callejeando libremente.

El examen coproparasitoscópico nos permite descubrir si una persona es o no portadora del gusano adulto al identificar huevos o proglótidos en sus heces. Los proglótidos permiten distinguir entre *T. solium* (la tenia del



9. CUANDO LOS CISTICERCOS invaden el sistema nervioso central producen neurocisticercosis. La figura de la izquierda muestra una imagen de resonancia magnética de un cerebro en corte sagital, en el que se observa la presencia de dos cisticercos en el ventrículo lateral. A la derecha, se presenta un corte anatómico coronal de un cerebro humano que manifiesta la presencia de dos cisticercos en masas grises.

ANA FLISSER (*arriba*); IGNACIO MADRAZO (*resonancia magnetica*) M.ª TERESA RABIELA (*corte anatomico*), (*abajo*)



10. CISTICERCOSIS OCULAR. Esta patología puede diagnosticarse mediante fundoscopia, técnica que utiliza un endoscopio para examinar el fondo del ojo en la cámara posterior. La secuencia de fotografías que comienza en el cuadro superior izquierdo y procede de izquierda a derecha, de arriba abajo, muestra, en el primer recuadro, un cisticerco dentro de su vesícula en la cámara posterior del ojo. En el curso de los tres recuadros siguientes, la larva evagina (sale de la vesícula), atraviesa la cámara posterior del ojo y pasa a la cámara anterior; en el cuarto recuadro se aprecian, además, el rostelo y las cuatro ventosas. El recuadro siguiente, el central de la serie inferior, nos ofrece el cisticerco de nuevo invaginado con su escólex. En la última fotografía, se observa el orificio abierto por el parásito durante su tránsito de una cámara a otra.

cerdo) y *Taenia saginata* (la tenia de vacuno), ya que ambas se alojan en el intestino del hombre.

Según el número de ramas laterales del útero de los proglótidos grávidos sabremos si nos hallamos ante *T. solium*, que tiene entre 7 y 11 ramas que nacen de un útero central, o ante *T. saginata*, que desarrolla 12 o más. Podemos considerar también el valor discriminante del escólex: la especie *T. solium* porta una doble corona de ganchos, estructura de la que carece *T. saginata*. En ambas especies los huevos son idénticos.

En 1990, Guillermina Avila, Flisser y Philip Craig desarrollaron un ELISA para la detección de antígenos de la tenia presentes en materia fecal (coproantígenos). Para esta prueba se producen anticuerpos en conejos mediante la inyección de un extracto total de tenia adulta; los anticuerpos se emplean luego en una reacción para identificar moléculas del parásito presentes en las muestras de materia fecal. En general, los estudios coproparasitoscópicos tienen una sensibilidad del 50 al 60 %, mientras que la del ELISA para coproantígenos es del 95 %.

Para el control de la teniosis-cisticercosis se han puesto a prueba diversas estrategias, desde el tratamiento masivo con drogas cestocidas y campañas de educación en salud hasta el desarrollo de vacunas. En un estudio amplio realizado en tres comunidades del estado de Morelos, el grupo de Flisser demostró la gran eficacia de la educación para la salud, centrada en la prevención de la cisticercosis porcina, y la conveniencia de dar tratamiento dirigido contra la teniosis intestinal.

Otra alternativa para el control de la cisticercosis es la vacunación de cerdos. Dos vacunas recombinantes, TSOL18 y TSOL45, de antígenos de oncosferas de *T. solium*, elaboradas por el grupo de Marshall Lightowlers, de la Universidad de Melbourne, y evaluadas por el grupo de Flisser, generaron 99,5 % y 97,1 % de protección, respectivamente, contra la cisticercosis porcina.

Otro candidato para el desarrollo de una vacuna contra la cisticercosis es la paramiosina de *T. solium*. Esta proteína constituye uno de los antígenos de *T. solium* reconocidos con mayor frecuencia por los anticuerpos de pacientes con neurocisticercosis. Se trata de una proteína de 863 aminoácidos, con alto contenido en residuos polares y una estructura secundaria de alfahélice en más de un 95 % de la secuencia de aminoácidos. Forma parte de la musculatura lisa de invertebrados. Laclette, en colaboración con Anne Nicholson, de la Escuela de Medicina de Harvard, demostró que se une a colágeno e inhibe la cascada del complemento, bloqueando así la función de su primer componente, el C1. (El complemento está constituido por más de 30 tipos de proteínas que son activadas por una reacción en cadena, que culmina con la for-





11. LA PRESENCIA DE CERDOS deambulando en libertad, que ingieren desecho, incluida materia fecal humana, promueve la cisticercosis porcina. Constituye un factor de riesgo para adquirir la infección por *Taenia solium*.

MANUEL PUIG SOLANES (*arriba*); PETER M. SCHANTZ (*abajo, izquierda y centro*), LAURA VARGAS-PARADA (*abajo, derecha*)

mación de agujeros o poros en la membrana del agente invasor, resultando en su destrucción.)

El grupo de Laclette propuso que la paramiosina secretada por el cisticerco impedía la activación de la cascada del complemento e inhibía la producción de otros mediadores de inflamación en la vecindad del parásito; desempeñaba, pues, un papel inmunomodulador al disminuir el reclutamiento de células hacia la interfase para evitar la confrontación con su huésped humano o porcino.

La respuesta inmunitaria humoral de ratones y de humanos en contra de la paramiosina, analizada por José Talavera, del laboratorio de Laclette, se halla dirigida hacia el extremo carboxilo, mientras que los individuos sanos que habitan en las mismas regiones endémicas muestran una vigorosa respuesta humoral y celular en contra del extremo amino terminal. Ello significa que la generación de una respuesta inmunitaria contra el extremo amino podría favorecer la protección de la cisticercosis.

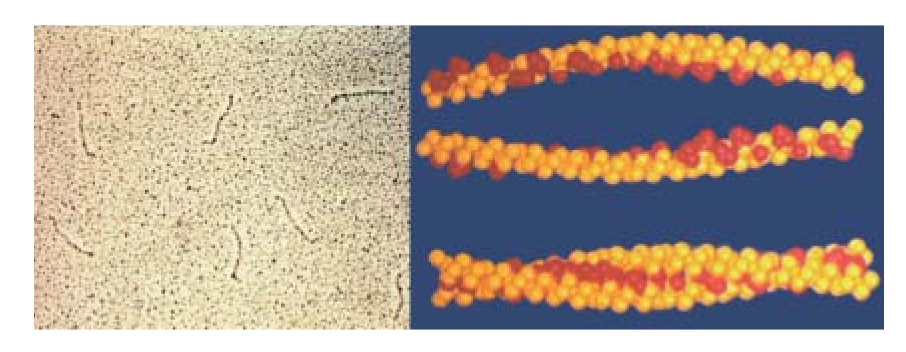
Genoma de *Taenia solium*

En 1990 las nuevas herramientas moleculares permitieron a Andrés Campos, del laboratorio de Laclette, clonar el primer gen de la *T. solium*: el gen codificador de actina. Desde entonces se han publicado más de 50 secuencias completas de diversos genes y otro tanto de genes secuenciados parcialmente. De todas estas secuencias, sólo la original de actina y la de paramiosina se han secuenciado a partir de clones genómicos; el resto procede de clones de ADN complementario.

En el genoma de un organismo se encuentra la información necesaria para su desarrollo y funcionamiento. Al abordar la estructura genética y poblacional de los cestodos, clase a la que pertenece *T. solium*, el grupo de Minoru Nakao y Akira Ito, de la facultad de medicina de Asahikawa, pusieron de manifiesto dos genotipos: en uno se asociaron los cisticercos de América Latina junto con los de Africa; en otro, se agruparon los cisticercos asiáticos.

Tomando en cuenta los datos históricos de la domesticación porcina, distribución de cerdos y colonización europea, así como las manifestaciones clínicas (neurocisticercosis en América y Africa y cisticercosis muscular en Asia) y sus propios resultados, el grupo de Nakao e Ito proponen que *T. solium* pasó de Europa a América con la conquista. Procedente de Europa se introdujo en Africa hace 500 años. La difusión hacia los países asiáticos resultó de un evento independiente.

En 2003, Nakao e Ito publicaron el genoma mitocondrial completo de *T. solium*. Desde 2004 la UNAM coordina el trabajo de secuenciación del genoma nuclear, proyecto en el que participan científicos de diversas instituciones de México. Derivado de este proyecto no sólo será posible identificar moléculas útiles para mejorar el diagnóstico y nuevos candidatos para vacunas, sino también la identificación de los genes que determinan el desarrollo del parásito.



12. PARAMIOSINA, proteína dimérica del músculo de invertebrados. Cuando se prepara con la técnica de sombreado rotatorio se observa formando filamentos (*izquierda*) a través del microscopio electrónico de transmisión. Las cadenas laterales de aminoácidos hidrofóbicos (*en rojo*) a lo largo de la paramiosina configuran un cintillo que induce la aparición de dímeros (*derecha*), como parte de la estructura secundaria de la proteína.

JUAN PEDRO LACLETTE (*izquierda*); CAROLYN COHEN (*derecha*)

Los autores

Ana Flisser, Laura Vargas-Parada y **Juan Pedro Laclette** han dedicado su vida académica al estudio de la *Taenia solium*. **Flisser** es investigadora en la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y directora de investigación del Hospital General "Dr. Manuel Gea González" (HGMGG). **Vargas-Parada** realizó su doctorado en el laboratorio de Laclette en la UNAM. Actualmente es investigadora posdoctoral en la Dirección General de la Ciencia de la UNAM e investigadora consultante en el HGMGG. **Laclette**, doctor por la UNAM, completó su formación en la Escuela de Salud Pública de Harvard. Dirige ahora el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM y es vicepresidente de la Academia Mexicana de Ciencias.

Bibliografía complementaria

TAENIA SOLIUM DISEASE IN HUMANS AND PIGS: AN ANCIENT PARASITOSIS DISEASE ROOTED IN DEVELOPING COUNTRIES AND EMERGING AS A MAJOR HEALTH PROBLEM OF GLOBAL DIMENSIONS. E. Sciuto, G. Fragoso, A. Fleury, J. P. Laclette, J. Sotelo, A. Aluja, L. Vargas y C. Larralde en *Microbes and Infection*, vol. 2, págs. 1875-1890; 2000.

A PROPOSAL TO DECLARE NEUROCYSTICERCOSIS AN INTERNATIONAL REPORTABLE DISEASE. G. Roman, J. Sotelo, O. Del Brutto, A. Flisser, M. Dumas, N. Wadia, D. Botero, M. Cruz, H. García, P. R. de Bittencourt, L. Trilles, C. Arriagada, P. Lorenzana, T. E. Nash, A. Spina-Franca en *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 78, págs. 399-406; 2000.

PROPOSED DIAGNOSTIC CRITERIA FOR NEUROCYSTICERCOSIS. O. H. Del Brutto, V. Rajshekhar, A. C. White Jr., V. C. Tsang, T. E. Nash, O. M. Takayanagui, P. M. Shantz, C. A. Evans, A. Flisser, D. Correa, D. Botero, J. C. Allan, E. Sarti, A. E. González, R. H. Gilman, H. H. García en *Neurology*, vol. 57, págs. 177-183; 2001.

NEUROCYSTICERCOSIS: REGIONAL STATUS, EPIDEMIOLOGY, IMPACT AND CONTROL MEASURES IN THE AMERICAS. A. Flisser, E. Sarti, M. Lightowlers y P. Schantz en *Acta Tropica*, vol. 87, págs. 43-51; 2003.

Polifenoles y salud

Propiedades biológicas de polifenoles de la uva y la granada

Los polifenoles se hallan ampliamente distribuidos en el reino vegetal. Forman parte de nuestra dieta a través de la ingesta de fruta y hortalizas, y derivados (zumos, vino y té). Metabolitos secundarios de las plantas, desarrollan una función defensiva contra el ataque de plagas y otros factores de estrés. Además, los polifenoles contribuyen de forma decisiva al sabor, aroma y color de frutas y hortalizas, determinando así la calidad de las mismas.

El grupo de polifenoles más abundante corresponde a los *flavonoides*. Comprende más de 5000 sustancias, entre las que destacan los *antocianos* (responsables del color rojo o púrpura de la uva tinta, la ciruela y la fresa), los *flavanoles* o derivados de la *catequina* (presentes en uva, cereza y, sobre todo, té y vino), los *flavonoles* (presentes en la mayoría de las frutas y muy abundantes en la cebolla), las *flavanonas* (en cítricos), las *flavonas* (en perejil, apio y pimiento) y las *isoflavonas* (sobre todo en soja). Dentro de los polifenoles *no-flavonoides* encontramos los *estilbenos* (en uva y vino, destacando el *resveratrol*), los *ácidos hidroxicinámicos* (abundantes en alcachofa, uva y brécol) y los derivados *hidroxibenzoicos* (por ejemplo, los derivados del ácido elágico y elagitaninos, en fresa, frambuesa, granada y nuez).

Amén de contribuir a la defensa de las plantas y a las propiedades sensoriales de frutas y hortalizas, los polifenoles destacan por sus efectos beneficiosos en la salud. Varios estudios epidemiológicos apuntan una correlación entre una dieta rica en frutas y hortalizas con una menor incidencia de enfermedades cardiovasculares, cánceres y otros trastornos. Se atribuye a los polifenoles un papel clave en dicha correlación.

La mayoría de los polifenoles muestran una potente actividad antioxidante: mediante la captación de radicales libres (especies altamente reactivas implicadas en la degradación de estructuras celulares) intervienen en el envejecimiento así como en enfermedades degenerativas. Desarrollan también otras funciones biológicas sin relación directa con su potencial antioxidante: antivírica, antibacteriana y anticancerígena, entre otras.

Gran parte de los estudios que "certifican" la actividad antioxidante y, por tanto, el potencial beneficioso para la salud de frutas y hortalizas, fundan sus conclusiones en experimentos *in vitro*, es decir, en trabajos realizados en unas condiciones que,

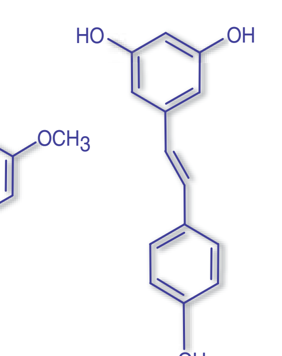
POLIFENOLES

Epigalocatequin-galato
Flavanol presente en té

Quercetina-3-glucósido
Flavonol presente en uva y cebolla

Cianidina-3-glucósido
Antociano presente en uva y vino

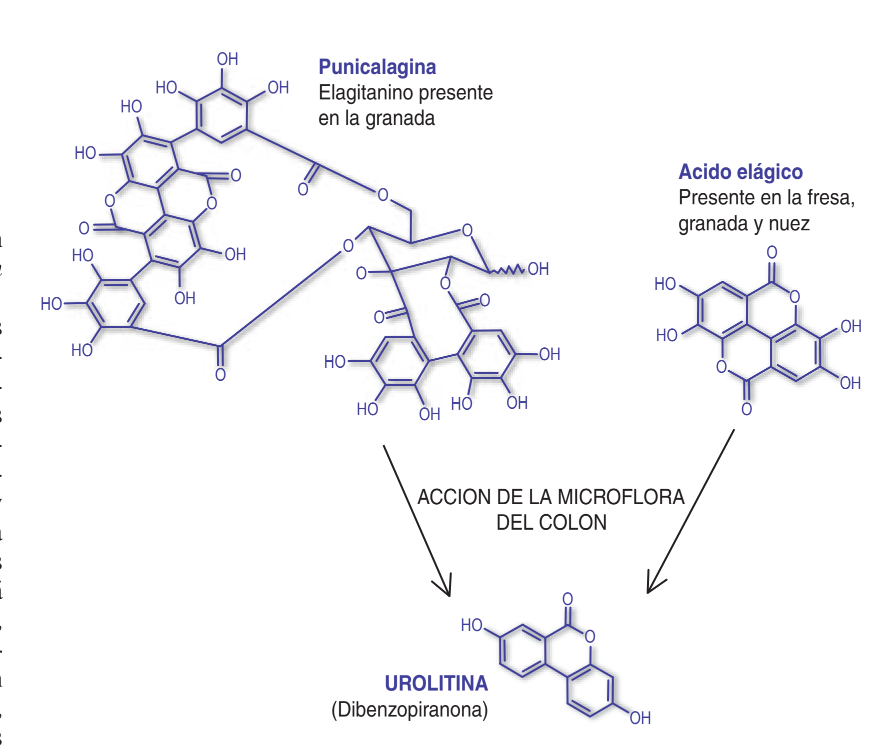
Hesperidina
Flavanona presente en naranja



Resveratrol
Estilbeno presente en uva y vino

Viniferina
Estilbeno presente en uva y vino

1. La flora del colon transforma los elagitaninos y el ácido elágico, ambos antioxidantes, en urolitina, un metabolito sin actividad antioxidante.



en la mayoría de los casos, distan un abismo de la situación real, *in vivo*.

Ante las expectativas depositadas en los polifenoles, se han desarrollado numerosos *nutracéuticos* (píldoras o cápsulas de extractos vegetales que comportan una elevada actividad antioxidante antienvejecimiento y preventiva de enfermedades) y *alimentos funcionales* (alimentos a los que se les atribuyen propiedades beneficiosas para la salud más allá de la nutricional propiamente dicha), que basan sus supuestas propiedades fisiológicas en el contenido en polifenoles (isoflavonas, antocianos, etcétera). Sin embargo, la realidad es que se desconocen todavía los procesos fisiológicos y patológicos que pudieran estar modulados por la ingesta de estos compuestos fenólicos; por tanto, las supuestas ventajas de estos productos para la salud que se aducen carecen de base. De hecho, en los últimos años se han acometido varias investigaciones para establecer la relación de los polifenoles de los alimentos y la salud: estudios de biodisponibilidad y metabolismo, y ensayos clínicos para comprobar el efecto protector de los polifenoles frente a enfermedades.

Los alimentos de origen vegetal revisten interés particular en la dieta mediterránea y en los beneficios que se le asocian. En nuestro grupo de investigación nos propusimos conocer de qué forma los polifenoles de los alimentos vegetales muestran actividad biológica *in vivo* relacionada con beneficios para la salud y si ésta puede aplicarse al desarrollo de alimentos más saludables. Para empezar se estudiaron dos productos característicos de la dieta mediterránea con un gran contenido en polifenoles: la uva y la granada.

La granada contiene una concentración elevada de polifenoles del grupo de los *elagitaninos* que muestran una extraordinaria actividad antioxidante *in vitro*. Su zumo se consume en grandes cantidades en Japón, Israel y Estados Unidos. Se le atribuyen propiedades antioxidantes; también una actividad estrogénica, que evitaría trastornos menopáusicos y cáncer de mama. Estas atribuciones, sin embargo, se enmarcan en una mezcla de "tradición" y "sabiduría popular" carentes de aval científico. Sí se ha descrito —en trabajos firmados por el mismo autor y "patrocinados" por una marca estadounidense de zumo de granada— que la administración de zumo de granada frena el desarrollo de la arteriosclerosis en ratones que la desarrollan de forma espontánea, reduciendo la presión arterial, la acumulación celular de colesterol y la peroxidación lipídica en los macrófagos. Dichos efectos se han atribuido a los polifenoles del zumo de granada, pero sin saber si éstos ejercen *in vivo* la misma actividad antioxidante que muestran *in vitro*.

2. Núcleos de células de melanoma. El resveratrol y el piceatanol desarrollan una potente actividad antimelanoma mediante la inducción de la apoptosis. La flecha señala la fragmentación del núcleo, típica del proceso apoptótico.

Investigaciones recientes realizadas por nuestro grupo en animales modelo (ratas y cerdos), líneas celulares (cancerosas y normales) y mediante ensayos clínicos en humanos (sanos y afectados de distintas patologías), muestran que la evaluación de la actividad antioxidante *in vitro* de polifenoles de alimentos debe realizarse con suma precaución, pues muchas de estas sustancias no se absorben como tales, sino que son metabolizadas por la microflora del colon, que los transforma en metabolitos (urolitinas) con escasa o nula actividad antioxidante. Son estos metabolitos los que se absorben, pasan al torrente sanguíneo y pueden mostrar efectos biológicos de interés, aunque sin relación con la actividad antioxidante.

Sin embargo, los polifenoles de la granada (*elagitaninos*) sí podrían ejercer acción anticancerígena en el colon antes de ser metabolizados por las bacterias: a concentraciones comparables con los niveles alcanzados *in vivo* tras la ingestión



3. Obtención de uvas funcionales mediante un tratamiento con luz ultravioleta que induce la producción de resveratrol, un anticancerígeno.

de un alimento que los contenga, ejercen un marcado efecto sobre el ciclo celular de células cancerosas e inducen apoptosis (muerte celular programada) en una vía molecular definida.

Estos resultados ponen en entredicho la validez de los ensayos *in vitro* para evaluar la actividad antioxidante de alimentos. En el caso de la granada y sus derivados, sus pretendidos efectos beneficiosos para la salud, fundados en las propiedades antioxidantes de los polifenoles, carecen de aval científico.

De estas investigaciones se infiere también que la microflora del colon desarrolla una función relevante en la actividad de los polifenoles de los alimentos. Los polifenoles se metabolizan en mayor o menor grado en función de la flora específica del individuo. Ello afecta a los niveles plasmáticos e intestinales de los metabolitos y, por tanto, repercute directamente en la actividad biológica de los mismos. Es decir, un mismo alimento ejercerá mayor o menor acción en un individuo en función de la flora colónica que posea.

La uva es muy rica en polifenoles, que pasan al vino en el proceso de vinificación. Produce cantidades reducidas de estilbenos, sobre todo resveratrol y viniferinas (fitoalexinas). En condiciones normales, estas moléculas se hallan en niveles bajos, casi indetectables; en situaciones de estrés, en cambio, su producción aumenta.

Varios estudios describen la inocuidad y la actividad estrogénica, antiagregante y antitumoral de los estilbenos. Se ha contrastado la función de estos compuestos en la prevención del cáncer y su absorción y biodisponibilidad cuando se administran alimentos que los contienen. A concentraciones comparables con los niveles *in vivo*, resultan potentes inductores de apoptosis en células cancerosas.

Puesto que la concentración de estas sustancias en uva es mínima y sin ninguna relevancia dietética, hemos patentado una técnica basada en la aplicación de luz ultravioleta, que incrementa, hasta más de 2000 veces, el contenido en estilbenos bioactivos (resveratrol, piceatanol y viniferinas) en uva recolectada. Este procedimiento, inocuo, remeda un factor de estrés natural (el ataque de patógenos, por ejemplo), que provoca en la uva un aumento de la producción de resveratrol. Se obtienen así uvas "funcionales" de alto contenido en resveratrol (varios miligramos por racimo medio), un compuesto anticancerígeno. En la actualidad, dos empresas cuentan con licencia para explotar la patente de este método para la futura comercialización de un producto farmacéutico y mosto enriquecido con resveratrol. La investigación llegará, por tanto, al consumidor.

JUAN CARLOS ESPÍN DE GEA
y FRANCISCO TOMÁS-BARBERÁN
Grupo de Investigación en Calidad, Seguridad y Bioactividad de Alimentos Vegetales, Depto. Ciencia y Tecnología de Alimentos,
CEBAS-CSIC, Campus de Espinardo, Murcia

Tamaño del cerebro e inteligencia de los animales

Adaptación a los cambios del entorno

El cerebro humano es un órgano excepcionalmente grande, incluso cuando se lo compara con el de otros primates. En los últimos tres o cuatro millones de años de evolución humana, el volumen del cerebro ha aumentado desde los 400 mililitros de los Australopitecos a los 1400 del *Homo sapiens* moderno. Esta tendencia evolutiva del crecimiento del cerebro no es una mera consecuencia de un aumento general del tamaño del cuerpo: el cerebro humano es tres veces mayor que el de un chimpancé, a pesar de que los seres humanos y los chimpancés pesan más o menos lo mismo. Los humanos modernos tenemos un cerebro desproporcionadamente grande para nuestro tamaño.

La tendencia a un aumento del tamaño relativo del cerebro no es exclusiva de los humanos, ni siquiera de los primates. El cerebro ha aumentado de forma independiente en diversos linajes de vertebrados; así ha ocurrido con delfines, elefantes, carnívoros, loros, cuervos y rapaces. Por qué algunos animales han desarrollado un cerebro grande resulta de lo más intrigante, ya que producir y mantener cerebros grandes es energéticamente muy costoso. ¿Qué beneficios ofrece tener un cerebro grande para que compense sus elevados costes?

Puesto que el cerebro procesa, integra y almacena información del entorno, y dado que existe una correlación entre su tamaño y el número de neuronas que contiene, las diferencias en el tamaño relativo del cerebro clásicamente se han asociado a diferencias en la inteligencia. Los costes de producir y mantener un cerebro grande se compensarían así

con la ventaja de una mayor inteligencia. Los humanos, con nuestro gran cerebro e inteligencia superior, seríamos el paradigma de la asociación cerebro-inteligencia. Sorprende, sin embargo, saber que hasta hace poco no existiesen pruebas empíricas de que un mayor tamaño del cerebro implique una mayor inteligencia. Algunos científicos cuestionaban incluso que existiese una definición universal de inteligencia.

Recientemente, varios psicólogos y ecólogos del comportamiento han coincidido en considerar la inteligencia como la capacidad general de los organismos de producir comportamientos flexibles para solucionar los distintos problemas con los que se enfrentan en la naturaleza, problemas que tienen que ver con la alimentación, las relaciones sociales o la respuesta a depredadores. Así, a un individuo que modifica su comportamiento de huida para aumentar sus posibilidades de sobrevivir cuando se enfrenta por primera vez con un nuevo depredador se le considera más flexible, y por lo tanto más "inteligente", que otro que persiste con su antiguo comportamiento.

En la nueva definición de inteligencia, los dos elementos clave son la innovación (invención de nuevos comportamientos) y el aprendizaje (alteración de comportamientos ya establecidos mediante la experiencia); estos dos procesos permiten a los animales modificar su comportamiento en función de las condiciones ambientales. Aunque quizás esta definición no capte toda la esencia de la inteligencia, parece que la creatividad y el aprendizaje son componentes importantes de lo que entendemos por inteligencia.

Pero, ¿cómo se puede cuantificar la inteligencia? En un artículo publicado en 1997, el psicólogo canadiense Louis Lefebvre, de la Universidad McGill en Montreal, propuso que la inteligencia de las aves se puede estimar utilizando uno de sus componentes básicos, la capacidad de innovación. Cuando los ornitólogos observan comportamientos en la naturaleza que creen novedosos —por ejemplo, una especie que utiliza un nuevo tipo de alimento o desarrolla una nueva técnica de alimentación— a menudo los publican en forma de nota breve en las revistas especializadas. Ejemplos clásicos de innovación son los herrerillos y carboneros a los que se ha visto abriendo botellas de leche, o los pinzones de Darwin, que utilizan ramitas para capturar insectos escondidos en agujeros.

Lefebvre apunta que la frecuencia con la que se informa de innovaciones refleja la flexibilidad de comportamiento de la especie y, por tanto, también el grado de "inteligencia": es de esperar que las especies más flexibles produzcan más innovaciones que las menos flexibles.

En los últimos 8 años, Lefebvre y sus colaboradores han recopilado más de 2000 casos de innovación en aves de seis regiones del mundo. La mayoría son observaciones prosaicas, como la adopción de nuevos tipos de alimento, pero de vez en cuanto se encuentran algunas realmente sorprendentes, que indican una elevada capacidad cognitiva. Durante la guerra de independencia de Zimbabwe, se observó a buitres con una forma curiosa de obtener carroña: esperar en las zanjas próximas a campos de minas a que las gacelas y otros herbívoros entraran en la zona, para comerse a los desafortunados individuos que morían víctimas de alguna explosión.

Gracias a la revisión exhaustiva de observaciones de comportamientos inusuales y oportunistas, Lefebvre ha podido demostrar que existen diferencias significativas en la capacidad de innovación de los distintos linajes de aves. Si asumimos que la propensión a innovar refleja inteligencia, las cornejas y los cuervos son las aves más inteligentes. Destaca cierta corneja de Nueva Caledonia (*Corvus moneduloides*), que presenta una capacidad poco usual de crear y utilizar una gran variedad de herramientas, con las que extrae comida de grietas y cavidades.

Pero sin duda el descubrimiento más importante del trabajo pionero de Lefebvre es que la frecuencia de innovación se correlaciona significativamente con el tamaño del cerebro: las especies con cerebros más grandes presentan, una vez se han eliminado las diferencias que se deben al tamaño corporal, mayor tendencia a innovar que las especies con cerebros menores. Nos hallamos así ante la primera prueba general de que tener un cerebro grande implica una inteligencia mayor.



1. Los loros y guacamayos se encuentran entre las aves más inteligentes, lo que les permite desarrollar una gran variedad de técnicas de alimentación complejas.

Trabajos posteriores han revelado que la relación entre tamaño del cerebro e inteligencia no es exclusiva de las aves. Con el mismo enfoque que Lefebvre, Simon M. Reader, de la Universidad de Utrecht, y Kevin Laland, de la Universidad de St. Andrews, han demostrado hace poco que existe también en los primates una relación positiva entre el tamaño del cerebro y la frecuencia de innovación. Además, han descubierto que las especies con cerebros más grandes presentan una mayor tendencia al aprendizaje social y al uso de herramientas. La integración de los trabajos de Lefebvre con los de Reader y Laland indica que existen aspectos comunes en la evolución del cerebro y la inteligencia en aves y mamíferos.

Cabe preguntarse por qué la inteligencia se relaciona con el tamaño *total* del cerebro si en realidad el cerebro ha evolucionado en mosaico, con regiones —ligadas a ciertas funciones— más o menos desarrolladas según las necesidades cognitivas de la especie. Así, las regiones del cerebro que se correlacionan mejor con la capacidad de innovación son las llamadas áreas de asociación, im-

plicadas en la elaboración de comportamientos complejos. Estas áreas están muy desarrolladas en aves y mamíferos; sobre todo, en especies con cerebros grandes. Tales áreas representan en ocasiones más del 50 % de la masa del cerebro. Por consiguiente, el tamaño del cerebro refleja bien el grado de desarrollo de las áreas de asociación, involucradas en los procesos de innovación y aprendizaje.

Otro avance reciente de interés es el descubrimiento de que, tanto en aves como en primates, la capacidad de innovación se correlaciona con la capacidad de aprendizaje y el uso de herramientas. Se respalda así la idea de que existe una forma de "inteligencia general", útil para satisfacer una gran variedad de necesidades. La capacidad de utilizar herramientas reviste, en los animales, particular interés, ya que supone un comportamiento complejo que durante mucho tiempo se consideró exclusivo de los humanos. Se empezó a cuestionar esta visión antropocéntrica cuando en los años sesenta Jane Goodall observó a chimpancés salvajes que construían y utilizaban herramientas. Desde entonces, se han descubierto multitud de ejemplos de uso de herramientas en una amplia diversidad de aves y mamíferos. No cabe la menor duda de que las características que definen la inteligencia "superior" no son exclusivas de los seres humanos.

Para saber por qué algunos animales han desarrollado cerebros grandes, debe también entenderse cómo un cerebro grande y una mayor inteligencia ayudan a los animales a sobrevivir y reproducirse en la naturaleza (que es lo que en última instancia determina que ciertas características se seleccionen y se den en un grado mayor en las siguientes generaciones). Quizás en los humanos resulte obvio que ser inteligente comporta muchas ventajas, pero dista de parecer tan claro cuando se trata de otros animales. Como señala Simon M. Reader, los animales que tienen que aprender los alimentos que han de comer o los depredadores que han de evitar son, en general, más vulnerables que los que poseen estas capacidades de forma innata.

Se ha propuesto un gran número de hipótesis sobre las ventajas selectivas de poseer un cerebro grande. Por ejemplo, se ha señalado que una mayor capacidad cerebral facilita el uso de recursos que varían en el tiempo y el espacio, permite la utilización de alimentos que cuesta extraer o mejora la capacidad de relacionarse con individuos que viven en un mismo grupo. Todas estas hipótesis implican complejidad del comportamiento y cambio en el entorno, aunque cada una se centra en un aspecto determinado de la complejidad y del cambio.

Quizás el cerebro y la inteligencia han evolucionado como una forma de respuesta general a cambios del entorno. A partir de esta idea, se ha sugerido que las distintas hipótesis propuestas para explicar la evolución del cerebro se pueden integrar en una hipótesis más general, la hipótesis del "tamaño del cerebro y el cambio ambiental".

Pero, ¿cómo se puede comprobar la hipótesis de que poseer un cerebro grande es una adaptación general a cambios del entorno? Una posibilidad sería introducir especies que difieran en el tamaño de su cerebro en regiones fuera de su área de distribución natural y ver si las especies con cerebros mayores se "adaptan" más fácilmente a las nuevas condiciones. Sobrevivir en un nuevo ambiente requiere múltiples ajustes en el comportamiento: encontrar nuevas fuentes de alimento, acomodar la reproducción a las nuevas condiciones ambientales o desarrollar respuestas a nuevos depredadores. En Israel, por ejemplo, la superioridad de las ratas negras a la hora de invadir regiones repobladas con pinos exóticos se debe a que es la única especie que ha aprendido la técnica necesaria para explotar su principal recurso, las piñas. Cabe, pues, esperar que las especies con cerebros grandes y mayor "inteligencia" sobrevivan mejor cuando se introducen en nuevas regiones que las especies menos flexibles.

Un grupo internacional de investigadores, al que pertenezco, ha contrastado esta hipótesis con aves. Para ello hemos utilizado la abundante información que existe sobre aves que en el pasado han sido introducidas por humanos en diversas regiones del mundo. De las 645 introducciones que analizamos, 243 fueron exitosas. Descubrimos que la diferencia entre el éxito y el fracaso tenía que ver, en parte, con el tamaño relativo del cerebro: la probabilidad de sobrevivir en el nuevo entorno era significativamente mayor en especies con cerebros grandes que en especies con cerebros



2. En los primates, el tamaño relativo del cerebro se asocia con la capacidad de innovación, de aprendizaje social y de utilización de herramientas.

pequeños, independientemente de la región de introducción o del número de individuos introducidos. Además, gracias a una técnica estadística, el análisis de vías*,* descubrimos que el mayor éxito de las especies con cerebros mayores guarda relación con su mayor capacidad de producir innovaciones. Estos resultados corroboran que la exposición a nuevas condiciones ambientales pudo haber sido uno de los factores que favorecieron la evolución de cerebros grandes.

Si el cerebro grande propicia la adaptación a los cambios o a las alteraciones del entorno, es de esperar que poseerlo sea particularmente ventajoso para los animales que se exponen a cambios ambientales frecuentes; por ejemplo, los que viven en ambientes estacionales.

En las regiones templadas del planeta, las aves han desarrollado dos estrategias distintas para afrontar los cambios estacionales: unas se enfrentan directamente a los cambios y permanecen todo el año en el área de cría, mientras que otras migran a regiones más templadas durante el invierno, en un intento de mantener su ambiente lo más constante posible.

La razón de que las especies hayan adoptado estrategias tan distintas podría tener que ver con la flexibilidad de su comportamiento. Comparando la flexibilidad de especies que residen en Europa todo el año con la de las especies que abandonan los cuarteles de cría en invierno, hemos descubierto que las especies residentes son más innovadoras y tienen tamaños de cerebro mayores que las especies migratorias. Estos resultados apoyan la idea de que las especies más flexibles poseen una mayor capacidad de adaptarse a los cambios del ambiente mediante ajustes del comportamiento y pueden, por tanto, residir todo el año en la misma región. En cambio, las especies menos flexibles, sin esta capacidad de adaptación, se verían obligadas a abandonar las áreas de reproducción en invierno, cuando el alimento es más escaso y difícil de conseguir.

Así pues, las pruebas disponibles sugieren que el cerebro sirve —y por tanto puede haber evolucionado— para responder a cambios o alteraciones del entorno. En el caso de los humanos, se ha conjeturado que el factor que inicialmente favoreció la evolución de cerebros grandes fue la reducción de los bosques húmedos que tuvo lugar hace entre 2 y 3 millones de años y que, al parecer, obligó a nuestros ancestros a pasar de los bosques a la sabana.

Pero el aumento del cerebro no tiene por qué ir inevitablemente ligado a cambios drásticos en el entorno; puede que en ocasiones sea resultado de la propia forma de vida del organismo. Contar con un cerebro grande puede ofrecer importantes ventajas en especies que utilizan recursos que varían en el tiempo y el espacio y cuya explotación, en consecuencia, requiere cierta flexibilidad. Con independencia de la naturaleza de las presiones selectivas, la necesidad de ajustar el comportamiento a una variedad de cambios o alteraciones del entorno parece haber sido una poderosa fuerza evolutiva que ha conducido al aumento del tamaño relativo del cerebro en algunos grupos de vertebrados.

DANIEL SOL
CREAF
(Centro de Investigación Ecológica
y Aplicaciones Forestales)
Universidad Autónoma de Barcelona

La inestabilidad de Rayleigh-Taylor

Interfaces entre fluidos de distinta densidad

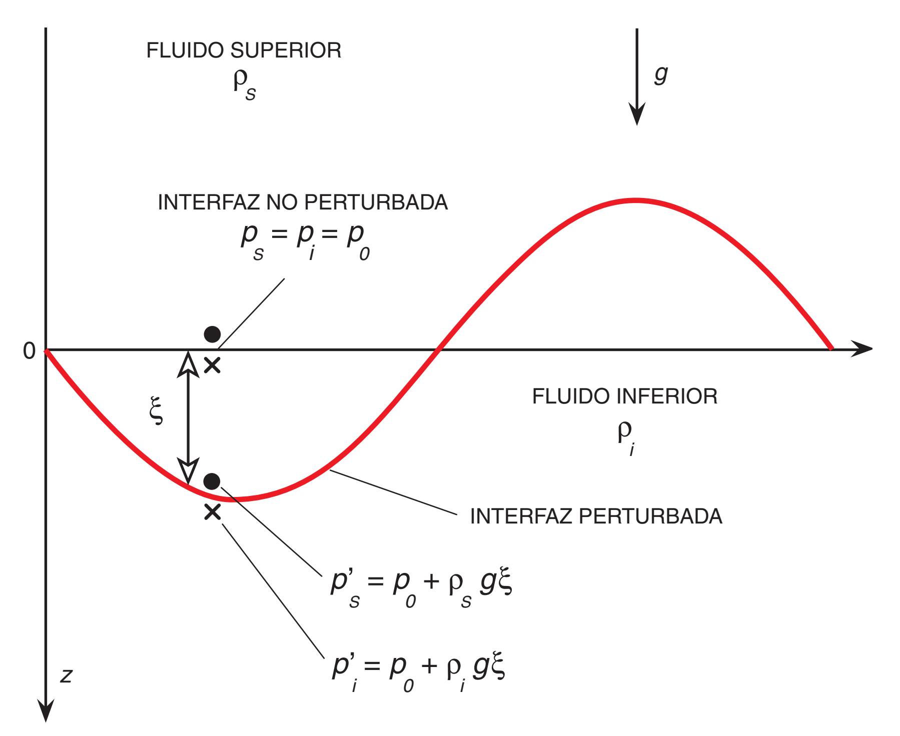
Ya en el siglo XVII, Evangelista Torricelli (1608-1647) demostró que la presión atmosférica producía una fuerza equivalente al peso de una columna de agua de diez metros de altura. Entonces, ¿por qué se cae el agua cuando volcamos un vaso que apenas contiene unos pocos centímetros de líquido? La respuesta está en el carácter inestable de la configuración que toma el fluido más denso, en este caso el agua, encima del menos denso, el aire. No basta que la presión atmosférica equilibre el peso del agua; se necesita además que el equilibrio sea estable.

Entre los sólidos, encontramos una situación análoga en un bolígrafo que reposa sobre una mesa o se mantiene de pie sobre su punta. En ambos casos, la fuerza de vínculo ejercida por la mesa equilibra el peso del bolígrafo; pero en el segundo caso se caerá, buscando una posición estable.

En los fluidos la manifestación de las inestabilidades es mucho más llamativa; al final conduce a un estado, la turbulencia, donde el movimiento del fluido es complicado y aleatorio. En el caso particular de un fluido situado sobre otro menos denso, la inestabilidad se conoce con el nombre de inestabilidad de Rayleigh-Taylor (RT), en honor de John William Strutt (Lord Rayleigh), quien fuera el primero en explicarla, en 1883, y de Sir Geoffrey Taylor, quien logró las primeras confirmaciones empíricas en 1950.

El tratamiento matemático de las inestabilidades hidrodinámicas resulta bastante complejo y su interpretación física, aun en aquellos casos en los que se obtienen soluciones exactas, sigue a menudo desafiando la intuición. Sin embargo, podremos entender de manera bastante sencilla la inestabilidad de RT si tenemos presente que en un fluido incompresible la presión p aumenta linealmente con la profundidad z en una magnitud que depende de la densidad ρ del fluido y de la aceleración g de la gravedad ($p = p_0 + \rho g z$, donde p_0 es la presión en $z = 0$).

Supongamos que tenemos una interfaz que separa dos fluidos superpuestos de densidades ρ_s y ρ_i, que la densidad ρ_s del fluido superior es mayor que la densidad ρ_i del fluido inferior y que inicialmente ambos están en equilibrio con una presión p_0 sobre la interfaz (que situaremos en $z = 0$). Si, por una perturbación aleatoria cualquiera, la interfaz se desplaza una distancia ξ hacia abajo, la presión sobre la interfaz aumentará proporcionalmente al desplazamiento ξ, pero en mayor medida en el fluido superior, más denso (*véase la figura 1*). Si el desplazamiento fuese hacia arriba ocurriría lo contrario. Siempre, pues, surgirá una diferencia de presiones a través de la interfaz, igual a $\Delta p = (\rho_s - \rho_i) g \xi$. Se crea así una fuerza que tiende a aumentar aún más el desplazamiento de la interfaz. De este modo, aunque una interfaz



1. Esquema de la interfaz entre dos fluidos de diferente densidad ($\rho_s > \rho_i$). La interfaz sin perturbar se encuentra en equilibrio a la presión p_0. Cuando una perturbación aleatoria produce un desplazamiento de la interfaz, se genera en ella una diferencia de presiones $p'_s - p'_i$ que tiende a aumentar la distorsión de la superficie.

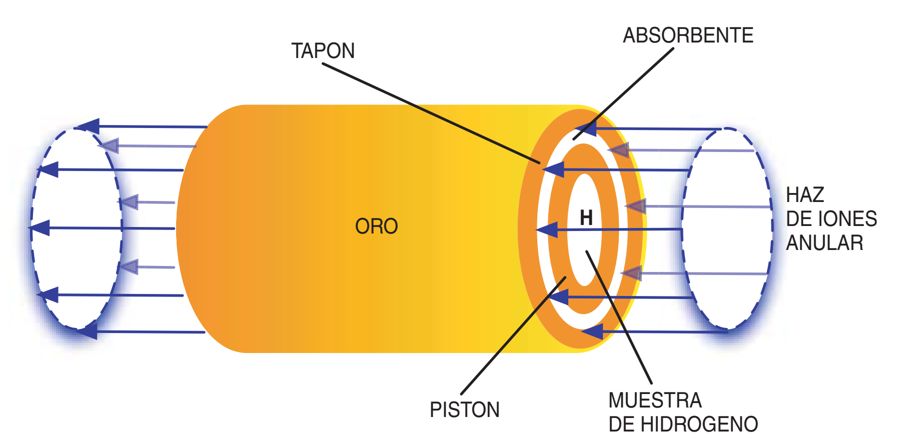
se encuentre momentáneamente en equilibrio, cualquier perturbación, por pequeña que sea, la llevará al desequilibrio.

La inestabilidad de RT es una de las inestabilidades hidrodinámicas que con más frecuencia se manifiestan en la vida cotidiana. Dista mucho de ser una mera curiosidad de laboratorio. No sólo hace que el agua se caiga al volcar un vaso; también tiene un papel importante en numerosos fenómenos naturales, desde la inversión atmosférica, que al impedir la renovación del aire retiene peligrosos contaminantes en las grandes ciudades, hasta la ignición de una supernova, final de la vida de algunas estrellas. Participa además en la deriva de los continentes, en la formación de burbujas en la sangre de un buzo y en muchos procesos industriales. A pesar de ello, no se le prestó demasiada atención hasta mediados del siglo XX, seguramente por su importancia en la implosión que inicia la detonación de una bomba atómica: los gases resultantes de una explosión química aplastan hacia el centro de la bomba una cápsula esférica, con la consiguiente compresión del material fisionable que lleva en su interior; como esta situación es intrínsecamente inestable, hay que controlar la inestabilidad de RT a fin de asegurar la eficacia de la detonación.

Procesos similares, en los que también un gas acelera a un fluido de mayor densidad, son comunes en astrofísica. La inestabilidad de RT puede en esos casos crear fantásticas estructuras, como las que se observan, por ejemplo, en las nebulosas del Aguila y del Cangrejo. En el laboratorio, una implosión de este tipo es la clave de uno de los métodos más espectaculares y prometedores de producir energía, limpia y casi inagotable, mediante la fusión termonuclear controlada: el confinamiento inercial, que irradia con láser o rayos X la superficie de la cápsula esférica que contiene el combustible de fusión.

La radiación evapora las capas superficiales de la cápsula, que queda así rodeada por una nube de plasma muy caliente; la nube produce presiones de hasta 100 Mbar (1 Mbar es 1 millón de atmósferas) sobre la superficie. De este modo, el plasma acelera la cápsula hacia el centro a un millón de kilómetros por hora. Al frenarse bruscamente en el centro, transfiere su energía cinética al combustible; se inician entonces las reacciones de fusión. Pero, también esta vez, la implosión sufre la inestabilidad de RT. Los procedimientos necesarios para controlarla determinan la energía mínima de ignición del combustible y, a la postre, el tamaño mínimo de un reactor de fusión y su coste.

Para la fusión inercial, resulta fundamental que la evaporación de la interfaz entre ambos fluidos ayude



2. Experimento LAPLAS (Laboratorio de Ciencias Planetarias), para la obtención de hidrógeno metálico sólido, que se planea realizar en el acelerador de partículas FAIR. Un intenso haz de iones pesados calentará una región anular de una cáscara cilíndrica de oro (el absorbente); al expandirse ésta, empujará el pistón hacia el centro y comprimirá el hidrógeno. Las capas externas de la cáscara (el tapón) contienen la expansión hacia el exterior.

a mitigar los efectos de la inestabilidad. Situaciones muy similares ocurren también en astrofísica; de ahí que la astrofísica de laboratorio naciese como un producto secundario de las investigaciones sobre la fusión inercial.

Otro interesante proceso de implosión es el que se empleará para obtener hidrógeno metálico sólido en un experimento con el acelerador de iones FAIR (siglas de Instalación para las Investigaciones con Antiprotones y Iones) que se construirá en el GSI (la Sociedad para las Investigaciones con Iones Pesados) de Darmstadt (Alemania). Se trata de comprobar las predicciones teóricas que Eugen Wigner y Ellsworth Huntington formularon en 1935, según las cuales el hidrógeno experimenta una transición al estado metálico sólido cuando se lo comprime a densidades de 1 g/cm^3 mientras se mantiene su temperatura por debajo de los 2000 kelvin. Para conseguir tales condiciones, se planea inducir la implosión de una cáscara cilíndrica de oro que encierra en su región axial una muestra de hidrógeno (*véase la figura 2*). Con un intenso haz de iones pesados se calentarán las capas intermedias de la cáscara; se generará entonces una presión de unos 5 Mbar, que acelerará las capas internas hacia el eje, para que compriman la muestra de hidrógeno. Alcanzar las condiciones deseadas requerirá, de nuevo, controlar la inestabilidad de RT durante la implosión.

Nuestros estudios indican que las propiedades elásticas y plásticas de la cáscara pueden reducir la velocidad de crecimiento de la inestabilidad y mitigar sus efectos. Estos experimentos podrían conducir a la obtención de un material extraordinario, si se confirman las predicciones sobre las propiedades superconductoras y estructurales del hidrógeno metálico sólido. Aportarán, además, información sobre la composición de los núcleos de los planetas gigantes Júpiter y Saturno.

Antonio Roberto Piriz
Escuela Técnica Superior
de Ingenieros Industriales
Universidad de Castilla–La Mancha
Ciudad Real

Josep-Maria Gili

La welwitschia

1. Desierto de Namib. A pesar de este paisaje desolador, la vida prolifera allí en formas insólitas y originales.

Welwitschia mirabilis es una planta endémica del desierto del Namib, entre el norte de Namibia y el sur de Angola. La especie constituye uno de los ejemplos más espectaculares de adaptación de la vida vegetal a las duras condiciones ambientales de los desiertos. La pluviosidad del desierto de Namib ronda los 2 milímetros anuales; puede tardar de 4 a 5 años en llover. A pesar de este paisaje desolador, la vida prolifera en formas y estrategias insólitas y originales. El desierto se halla a poca distancia del océano Atlántico. Se cree que las plantas que medran en él aprovechan esta proximidad para captar la humedad procedente del mar.

La welwitschia es una de las plantas más antiguas de la Tierra, un auténtico fósil viviente. Forma dos hojas que crecen de 8 a 15 centímetros por año; surgen de un tronco leñoso corto. Es quizá la planta más longeva que se conoce: se calcula que un talo puede alcanzar más de 1000 años de vida, incluso hasta 2000. Absorbe el agua del rocío mediante millones de estomas distribuidos en la superficie de las hojas. Se reproduce por semillas y germina formando cotiledones. El escarabajo *Probergrothius sexpunctatis*, que vive sobre talos femeninos y se alimenta de la savia, se encarga de la polinización. *Welwitschia* corresponde a uno de los géneros vegetales más evolucionados. Presenta caracteres que lo sitúan entre las gimnospermas y angiospermas o plantas con flores.

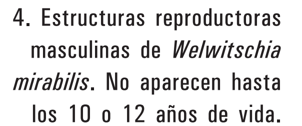


2. Arbusto de dólares (*Zygophyllum stapfii*). Otra de las especies de interés que medran en el desierto de Namib. De hojas carnosas, constituye uno de los manjares preferidos de los antílopes que cruzan el desierto.



3. Ejemplar de *Welwitschia mirabilis* con hojas de más de un metro de longitud que perduran durante toda su larga vida.

FOTOGRAFIAS DE JOSEP-MARIA GILI



4. Estructuras reproductoras masculinas de *Welwitschia mirabilis*. No aparecen hasta los 10 o 12 años de vida.



5. Cotiledones de un talo femenino de *Welwitschia mirabilis* de unos 30 milímetros. De ellos emergen los capullos y de éstos las dos hojas.

Arte y lógica de la conversación

Si se concibe como un método de cálculo, la lógica reduce el razonamiento a un proceso individual. Aplicada al juego de la conversación, en cambio, confiere al razonamiento un carácter dinámico y describe varias formas de intercambio de información

Johan van Benthem

Todos tenemos en mente inferencias cuyas conclusiones obligan a cualquiera, sea rey o menestral. En ellas suelen aparecer implicaciones, proposiciones condicionales que obedecen al esquema "Si *A*, entonces *B*". Hallamos un ejemplo de regla irrefutable en el *Modus Ponens*, que se remonta a la antigüedad griega: de las premisas *A* y "si *A* entonces *B*", se concluye *B*. Esta regla lleva a otras, como el *Modus Tollens*: de "si *A* entonces *B*" y no-*B*, se concluye no-*A*. Esta última regla permite contradecir a un adversario que sostenga *A*: basta con "inventarse" una implicación en la que *B* sea consecuencia de *A*.

Estas inferencias lógicas descansan en certidumbres irrefutables. A partir de una serie de etapas lógicas evidentes se construye un bloque inexpugnable. Al razonar en nuestra vida cotidiana efectuamos a menudo cálculos proposicionales de este tipo.

Supongamos que desea usted organizar una fiesta, respetando las incompatibilidades y antipatías entre los invitados. Sabemos, por ejemplo, que:

(a) Juan vendrá si vienen Ana o María.
(b) Ana vendrá si no viene María.
(c) Si Ana viene, Juan no vendrá.

Según estas restricciones, ¿a quién podremos invitar? La solución se alcanza tras unos pocos pasos lógicos. Según (c), si viene Ana, Juan no vendrá. Pero, según (a) si Ana viene, Juan también. Ello conduce a una contradicción, luego Ana no puede ser invitada. Entonces, de acuerdo con (b), María vendrá. Por tanto, según (a), Juan debe venir. Así pues, el grupo (Juan, María) satisface las tres condiciones. Millones de etapas equivalentes se utilizan en los programas informáticos de depuración de errores.

Calculemus!

La lógica, en la medida en que busca verdades absolutas, está vinculada a la historia de las matemáticas. Desde la Antigüedad clásica, la demostración matemática y axiomática, según la introdujo Euclides en sus *Elementos*, constituye un modelo de razonamiento. También las matemáticas clásicas

se fundan en la demostración y la definición axiomática. A los lógicos les hubiera encantado demostrar que estas matemáticas son de toda garantía, es decir, que están libres de contradicciones demostrables; sin embargo, en 1933, el teorema de incompletitud de Gödel echó por tierra tales esperanzas.

Con el paso de los siglos, la lógica se ha acabado asociando a cálculos y máquinas. Para resolver las disputas lógicas, Leibniz aconsejaba *Calculemus!*: según él, bastaría que las partes en disputa tradujesen sus opiniones en fórmulas, de las que se podría separar la mena de la ganga mediante simple cálculo binario. Observemos que esta metodología reduce la intervención de varios interlocutores a un único proceso de cálculo.

Aparecieron, por fin, las máquinas de calcular. Alan Turing propuso, allá por los años treinta del siglo pasado, una "máquina" (precursora de los ordenadores modernos) concebida para analizar el alcance y los límites del cálculo matemático.

Sin embargo, uno de los primeros resultados concernientes a este tipo de máquinas vino a quebrantar las convicciones de los partidarios de la lógica calculatoria. Si presentamos datos bien definidos a una máquina de Turing, ¿sabemos si acabará ésta por detenerse? Turing demostró en 1937 que esta cuestión constituye un indecidible: no existe un método garantizado (un algoritmo) que permita hallar la respuesta. Tal resultado estaba emparentado con el teorema de incompletitud de Gödel (1933).

Ello no ha impedido que la lógica matemática y la informática floreciesen en el transcurso del siglo XX. Toda suerte de algoritmos y de sistemas de demostración anunciaron la revolución en el tratamiento de la información que hoy presenciamos. De hecho, Alan Turing, Kurt Gödel y Ludwig Wittgenstein, filósofo que se interesó por estas cuestiones, figuran en la lista de los 20 intelectuales más influyentes del siglo XX, según publicó la revista *Time* a comienzos del año 2005.

De vuelta a la conversación

Pero la lógica no siempre se ha reducido a un cálculo. Otra imagen, que nos llega de la Antigüedad, nos habla de debates y disputas en el seno de la *polis* griega. Pensemos en los sofistas y la dialéctica de Platón, donde Sócrates refuta a estos interlocutores mediante juiciosos argumentos.

Esta otra concepción de la lógica y de la argumentación guarda mayor semejanza con un juego: varios jugadores proporcionan cada uno una respuesta a las cuestiones que otros proponen; el debate deja un regusto de derrota a quienes no han sabido mover sus piezas (en este caso, sus argumentos) en el orden debido.

La conversación permite razonar de forma distinta. Rompe la soledad del cálculo: en lugar de inferir conclusiones, aislados en nuestro rincón, podemos también preguntar. Una pregunta y su respuesta constituyen el más sencillo de los intercambios de información entre dos personas. El proceso respeta, asimismo, reglas lógicas claras.

Tomemos el diálogo siguiente: Crispín: "Ese edificio, ¿es el museo del Prado?". Ramona: "Sí, así es".

Procedemos de este modo en numerosas ocasiones. Veamos cómo circula la información. Crispín, el interrogador, expresa que no está seguro de encontrarse frente al museo del Prado. Al dirigirse a Ramona, da a entender que considera posible que Ramona conozca la respuesta. Mediante el diálogo comunicamos una información sobre los hechos, pero también referente a lo que sabemos sobre los demás.

Ramona, al responder, no sólo hace saber que el edificio es el Prado: ahora Ramona sabe que Crispín también lo sabe, y Crispín sabe que ella lo sabe, y así indefinidamente. Según la terminología de la filosofía moderna, la lingüística o de la teoría de juegos, Crispín y Ramona han adquirido un conocimiento común del hecho referente al Prado.

Para comprender la importancia de la compartición del conocimiento, imaginemos que usted se hubiera enterado del número de mi cuenta corriente: si usted supiera que yo ignoro que usted lo sabe, pudiera sentirse tentado de saquearla; en cambio, si usted supiera que yo sé que usted lo sabe, sin duda se abstendría de tal fechoría.

Consideremos esta otra situación. Los miembros de un jurado, Xavier,



1. EL JUEGO *CLUEDO* simula perfectamente los intercambios de información en un grupo. El objetivo es descubrir al asesino, el arma y el lugar del crimen, elementos que se indican en tres cartas que primero se extraen y luego se ocultan. Las demás cartas se reparten entre los jugadores. Cada uno de ellos, por turno, emite una hipótesis, que los otros jugadores, cuando les es posible, refutan revelándole en secreto una de las cartas de su mano. Mediante estas sucesivas informaciones, los jugadores eliminan ciertas combinaciones hasta llegar a la única posible.

POR CORTESIA DE HASBRO PROPERTIES GROUP/*Pour la Science*

Yago y Zoé han de elegir entre Ana y Bernardo. Cada uno de los jurados escribe un nombre en un boletín de votación; el escrutador recoge los tres boletines. Tras leerlos, anuncia: “No existe unanimidad”. Entonces, Yago le muestra su boletín a Xavier, pero no a Zoé. Xavier declara que él no sabe todavía quién es el candidato elegido. ¿Quién sabe ahora el resultado de la votación?

Esta mixtura de declaraciones y acciones parcialmente ocultas permite a Zoé deducir la conclusión, pero a nadie más. Cuando el escrutador habla, todos saben que el resultado ha sido, o bien *AAB*, o bien *ABB* (siendo *A* y *B* las iniciales de los candidatos). Si Xavier y Yago hubiesen votado a la misma persona, Xavier habría conocido el resultado en cuanto hubiese visto el boletín de Yago. No siendo éste el caso, el voto de Zoé resulta decisivo. Todo el mundo puede seguir este razonamiento, tanto así que Xavier y Yago saben que Zoé sabe.

Los razonamientos de este tipo, interactivos y nutridos de varias fuentes, forman parte de nuestras vidas. Los practicamos asimismo en juegos de mesa como el *Cluedo*, en el que se recopila información para la resolución de un enigma policíaco. Los juegos de este tipo constituyen una mina de informaciones para los lógicos.

Los ejemplos anteriores nos hacen ver que los grupos disponen de formas especiales de conocer, formas irreductibles al conocimiento de los individuos: la compartición de la información en el seno de un grupo engendra informaciones nuevas. La lógica epistémica, la rama de la lógica que estudia el conocimiento, ha introducido operadores correspondientes a las diversas formas de conocimiento existentes en el seno de un grupo. Esta lógica demuestra ser tan precisa como la lógica matemática. Se conocen sistemas completos de axiomas para ella. Nos falta comprender su dinámica.

El uso de la informática

Una conversación corresponde a una secuencia ordenada de declaraciones. Si vamos a pedir una subida de sueldo a nuestro jefe, debemos presentar nuestras razones en el debido orden. Empezaremos alabando su inspirada labor directiva. Luego, le pediremos el aumento. Nunca a la inversa. Esto puede considerarse programación, es decir, la elaboración de una secuencia de instrucciones. En función de la actitud del jefe, crispada o distendida, adaptaremos nuestra expresión. En programación, hablaríamos de una cláusula condicional: “Si..., entonces..., y si no...”. Si una mano de jabón halagadora no resulta suficiente, se prosigue hasta conseguir lo deseado: estamos utilizando entonces la instrucción “mientras... haz...”

Se constata así que las estrategias de conversación incorporan las principales instrucciones informáticas. Se puede, pues, aplicar la lógica dinámica de programación, nacida en los primeros años setenta, al estudio de la comunicación. En sus orígenes, estas lógicas servían para la elaboración de programas informáticos y el estudio de su comportamiento. En la actualidad, describen cualquier situación en la que circule información. He aquí un ejemplo reciente de la aplicación de las ideas fundamentales de la informática (no sólo de sus medios técnicos) a otras disciplinas.

LOS OPERADORES DE LA LOGICA EPISTEMICA DINAMICA

La lógica epistémica define operadores de forma que se conserve la senda que ha seguido la transmisión de información. En un grupo *G* de agentes *i*, una proposición *p* representa un saber en los dos casos siguientes:

— El agente *i* sabe que *p*, situación que se denota $K_i p$.

— *p* corresponde a un conocimiento común del grupo *G*, situación que se denota $C_G p$.

Con el propósito de describir los efectos de un acto de comunicación, la lógica epistémica dinámica introduce otro operador. Se enuncia “Tras una declaración pública de que *A* es verdadera”; se denota $[!A]$. El enunciado “Tras una declaración pública de que *A* es verdadera, el agente *i* sabe que *p*” se denota, en consecuencia, $[!A]K_i p$.

Se han construido sistemas completos de axiomas basados en estos operadores, que permiten efectuar cálculos formales de lógica epistémica dinámica. Los axiomas siguientes se utilizan para analizar los efectos complejos del enunciado *A*:

(1) Las declaraciones públicas verídicas no afectan a la realidad. En otras palabras, una proposición elemental *p* es verdadera tras una declaración pública de que *A* es verdadera si y solamente si *A* implica *p*. Este axioma se denota: $[!A]p \Leftrightarrow A \Rightarrow p$.

(2) Tomemos el caso en que *A* designa la llegada de un huracán. Si *A* no se da a conocer, el huracán provocará víctimas, que se evitarán, en cambio, si *A* se comunica. Generalicemos este efecto: tras una declaración pública de que *A* es verdadera, es el caso de no-ϕ (donde ϕ corresponde a una proposición compuesta) si y solamente si *A* implica que la no declaración pública de *A* implica ϕ: $[!A]\neg\phi \Leftrightarrow A \Rightarrow \neg [!A]\phi$.

(3) Asimismo, el anuncio del huracán lleva consigo una serie de medidas de urgencia y de ayuda mutua si y sólo si este anuncio implica, de forma independiente, medidas de urgencia por una parte, y reacciones de ayuda mutua, por otra. Tras una declaración pública de que *A* es verdadera, es el caso de la conjunción de ϕ y de ψ si y solamente si, a la vez, una declaración pública de *A* indica que ψ: $[!A](\phi\wedge\psi) \Leftrightarrow [!A]\phi\wedge[!A]\psi$.

Los axiomas (2) y (3) corresponden a una forma de determinismo: el anuncio de *A* no concierne directamente a ϕ, sino que informa acerca de ϕ (su negación o su conjunción con ψ).

Por último, los dos axiomas siguientes indican cómo calcular por adelantado los efectos de un anuncio a partir del estado de conocimiento de los agentes.

(4) Tras una declaración pública de que *A* es verdadero, el agente *i* sabe que ϕ si y solamente si *A* implica que el agente *i* sabe que la declaración pública de *A* indica ϕ: $[!A]K_i\,\phi \Leftrightarrow A \Rightarrow K_i[!A]\phi$.

(5) Tras una declaración pública de que *A* es verdadera, ϕ corresponde a un conocimiento común del grupo *G* si y sólo si es de conocimiento común en el grupo *G* que el anuncio de *A* implica ϕ al suponer que *A*: $[!A]C_G\,\phi \Leftrightarrow C_G(A, [!A]\phi)$.

Mediante la combinación de las lógicas dinámica y epistémica se obtienen nuevos operadores y un sistema completo de axiomas.

La dinámica de la comunicación

El lenguaje determina la cognición: cada intervención modifica el estado de información de los presentes. Para modelizar este hecho, retomemos el caso de la lista de invitados que habíamos planteado al comienzo del artículo. En ausencia de información y de restricciones, existen ocho combinaciones de invitados. Las denotaremos de forma compacta, usando las iniciales M, A y J, y el signo $\neg$ para indicar la ausencia de la persona cuya inicial va a continuación: $\{MAJ, MA\neg J, M\neg AJ, M\neg A\neg J, \neg MAJ, \neg MA\neg J, \neg M\neg AJ, \neg M\neg A\neg J\}$.

Este conjunto de combinaciones define el estado inicial. Cada una de las tres restricciones formuladas impone una actualización de este estado, por supresión de las opciones incompatibles con aquélla. El conjunto de combinaciones posibles se reduce poco a poco:

(a) Si (M o A) entonces J, lo que impone el nuevo estado $\{MAJ, M\neg AJ, \neg MAJ, \neg M\neg AJ, \neg M\neg A\neg J\}$;
(b) Si $\neg M$ entonces A, lo que implica $\{MAJ, M\neg AJ, \neg MAJ\}$;
(c) Si A, entonces $\neg J$, por lo que la única solución posible resulta $\{M\neg AJ\}$.

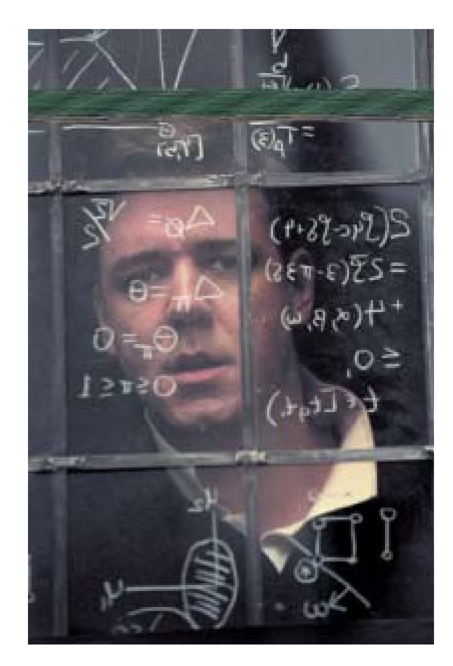
En el ejemplo anterior no aparece ninguna información nueva en el curso del razonamiento. Cuando jugamos a *Cluedo*, en cambio, vamos actualizando nuestros conocimientos a medida que se nos suministran nuevas informaciones. Así resolvemos el enigma que sigue.

Unos niños, que han estado jugando en el jardín, se han manchado la frente de barro. Cada uno puede ver el barro en la frente de los demás, pero ignora si él mismo está manchado. Su padre, al llegar, les dice: "Por lo menos uno de vosotros se ha manchado. ¿Alguno sabrá decir con certeza si está manchado o no?". Los niños responden con sinceridad.

En general, si hay k niños embarrados, éstos manifiestan su ignorancia durante $(k - 1)$ turnos, después de los cuales se alcanza un conocimiento común de los que se han manchado y de los que no.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado lógicas epistémicas dinámicas generalizadas, que permiten el análisis y la descripción de formas de comunicación más complejas que los ejemplos precedentes.

En el enigma de los niños embarrados, las declaraciones son de conocimiento público: todos las conocen. En el caso del jurado, uno de los jurados le muestra su boletín al vecino, con lo que transmite una información distinta a los presentes: los demás ven sólo que está comunicando una información, pero no conocen el contenido.



2. LA VIDA DE JOHN NASH se llevó a la gran pantalla. Este teórico de los juegos demostró la existencia de situaciones de equilibrio que tienen en cuenta las preferencias de los jugadores.

Enunciados ocultos y mentiras

En otros casos se desconoce incluso que se ha transmitido una información. El correo electrónico da lugar a situaciones de este tipo. Cuando enviamos un mensaje, el campo de copia ("copia carbón" o *cc*) lo convierte en un mensaje público: su contenido se convierte en conocimiento común para el grupo de destinatarios. Mediante el campo de copia oculta ("copia carbón oculta" *cco*), en cambio, se transmite el mensaje a un grupo cuyos miembros desconocen quiénes disponen de copia, lo que permite combinar con mayor finura la información y la ignorancia.

Se alcanza otro nivel de complejidad cuando se tiene en cuenta la posibilidad de trapacerías o falsedades. Son muchos los padres y las madres que piensan que sus hijos no mienten o que mienten mal porque son angelicales, pero eso es porque sus niños no dominan todavía las reglas lógicas y sociales de la mentira.

Otra fuente de complejidad en los sistemas lógicos de la conversación proviene del cálculo estratégico, análogo a la programación y parecido a la petición de aumento de sueldo. Planificamos nuestras declaraciones futuras con el propósito de lograr ciertos efectos; esta planificación se halla emparentada con los problemas de calculabilidad de la máquina de Turing.

Los lógicos demostraron hace ya algunos años que la planificación de una conversación a partir de declaraciones públicas y de secuencias informáticas constituye, en general, una tarea indecidible. Ello no significa que no podamos alcanzar nuestros objetivos mediante la conversación, sino que ello suele requerir habilidad y creatividad. No existe una forma automática y garantizada de lograr un aumento de sueldo, ni de convertirnos en amos y señores de la conversación.

Lejos de entrañar el final de la lógica epistémica dinámica, esta constatación define precisamente el punto de salida. Los individuos que componen un grupo muestran una gran diversidad. No todos tienen los mismos conocimientos ni iguales aptitudes para el manejo de la información. Cuando jugamos a *Cluedo* —aunque también durante cualquier otra actividad—, elaboramos previsiones referentes a los hechos y a nuestro entorno, y actuamos en consecuencia. Para mantenernos en sincronía con la realidad, sin embargo, hemos de estar actualizando continuamente tales previsiones. En numerosas ocasiones nos vemos de repente sorprendidos por nuevas observaciones, o contradichos por nuestros interlocutores, lo que nos obliga a revisar creencias o hipótesis.



3. SALVAR AL IDOLO. Un arqueólogo trata de apoderarse de un ídolo. El objetivo del juego consiste en impedírselo, cortándole el paso. Empezamos bloqueando uno de los caminos rojos. El arqueólogo, a su vez, se desplaza tomando una de las rutas todavía abiertas. Cada jugador modifica el estado del juego: éste es el elemento que define la interactividad de un juego, situación que se da también en la conversación.



Juegos y estrategias

Otro desarrollo reciente de la lógica se ocupa de la interacción entre varios agentes. Los juegos proporcionan modelos de este tipo de interacciones. Hemos visto, además, que la argumentación corresponde a una forma de juego que implica una secuencia de concesiones mutuas, en el que cada jugada depende de las jugadas de los demás. Veamos aquí un jueguecito que pone de manifiesto la interactividad de las jugadas. Lo titularemos "Salvar al ídolo".

El arqueólogo I.J., provisto de un gran látigo, ansía apoderarse de un ídolo. Nuestro objetivo es mantener el ídolo a salvo (*véase la figura 3*). Comenzamos cortando uno de los caminos que conduce hasta la estatuilla; luego, el arqueólogo recorre una etapa a lo largo del camino todavía sin hollar, y así sucesivamente. ¿Podremos impedir que alcance el ídolo o, por el contrario, I.J. logrará siempre hacerse con él?

Podríamos bloquear enseguida los caminos 1 o 2, pero entonces perderíamos. Si cortamos el camino 1, I.J. se desplazará hasta el pozo de la parte inferior y, por tanto, deberemos cortarle el camino 7. Pero entonces él tomará uno de los caminos 3 o 4, y siempre le quedarán en reserva el 5 o el 6 para llegar al ídolo. Si cortamos el camino 2, perderemos aún más rápidamente.

La estrategia ganadora es otra: se comienza cortando el camino 5 o el 6; después, se bloquean los caminos conducentes al ídolo en función de los movimientos de I.J. Si se realiza correctamente, tendremos el tiempo a nuestro favor y lograremos, aunque por poco, que el ídolo resulte inaccesible para I.J.

La teoría de juegos se centra en el estudio de estrategias. En 1913, Ernest Zermelo demostró un teorema que constituye una de las más antiguas aportaciones de este campo. Afirma éste que en los juegos de dimensión finita (como el "Salvar al ídolo") uno de los dos jugadores cuenta siempre con una estrategia ganadora, vale decir, un método garantizado para vencer al adversario.

A Zermelo le interesaba el ajedrez. En este juego, su análisis demostraba que, o bien las blancas tienen una estrategia vencedora, o bien las negras cuentan con una "estrategia para no perder". Desgraciadamente, su demostración no resulta constructiva: un siglo después, seguimos sin saber cuál sea esta estrategia, pues el conjunto de las posibles partidas de ajedrez es desmesuradamente grande.

El teorema de Zermelo fue redescubierto por el único campeón del mundo de ajedrez que ha producido mi Holanda natal: Max Euwe publicó este mismo resultado en 1929. Sin embargo, el santo patrón de la teoría de juegos es John Nash, premio Nobel de economía en 1993, cuya biografía *Una mente maravillosa* fue llevada al cine en 2001. La teoría fundada por Nash no se ocupa sólo de las estrategias ganadoras; define también las situaciones de equilibrio, en las que a ninguno de los agentes le interesa cambiar su estrategia, en función de sus preferencias.

La atención se centra ahora en nuevos tipos de juegos: con el propósito de revelar qué prácticas llegarían a instaurarse a largo plazo en el seno de una comunidad, en lugar de juegos finitos se están estudiando juegos repetidos infinitamente. Este tipo de análisis sirve para estudiar la evolución de las poblaciones de predadores y de presas, y también los comportamientos cooperativos en sociedades humanas.

Metáforas y realidad

Los desarrollos que hemos mencionado siguen siendo, en esencia, matemáticos, lógicos o computacionales. Ahora bien, ¿qué hace, en realidad, la gente cuando conversa, se comunica o juega con otros?

A los lógicos les interesan los datos recogidos por las ciencias cognitivas sobre los procesos de la inteligencia humana: éstos reflejan no sólo los errores y las locuras del razonamiento, sino también prácticas estables y eficaces que carecen todavía de explicación.

De este modo, la investigación actual en lógica reconcilia la lógica teórica y el estudio empírico del razonamiento y de la puesta al día de nuestros conocimientos en la vida cotidiana. A estas dos "bisagras" podemos añadir una tercera: las nuevas prácticas de razonamiento, a menudo virtuales y no pocas veces inspiradas por la informática.

Las nuevas ideas en lógica navegan libremente entre estos tres puntos de anclaje. Por ejemplo, la lógica epistémica dinámica sugiere una fuerte

analogía entre la informática y la conversación. Desde esta óptica, el resultado de indecidibilidad que hemos citado al respecto de la planificación de la conversación puede enunciarse así: la potencia de cálculo de un grupo de agentes equivale a la de los computadores universales. (Admitido que así es, nuestra opinión sobre las tertulias de café nunca volverá a ser la misma.)

El correo electrónico constituye, pues, una nueva práctica social creada por la informática. Un proyecto de investigación más ambicioso consistiría en la "programación" de tales prácticas siguiendo una metodología informática. Este "software social" requiere una comprensión más completa de los algoritmos en contexto incierto, como los que hemos descrito.

La lógica moderna se ha desarrollado a lo largo de una búsqueda de certidumbres absolutas y con la esperanza de dar mayor firmeza al edificio de las matemáticas. Pero tal esperanza era vana. En realidad, nuestros razonamientos se sostienen porque damos a la información un tratamiento dinámico e interactivo, y porque enmendamos nuestras convicciones cuando se demuestra que éstas son inadecuadas.

Por tanto, la lógica no se erige en guardián de una seguridad eterna en un mundo ideal, depurado de contradicciones. La lógica vendría a ser más bien el sistema inmunitario dinámico del pensamiento.

El autor

Johan van Benthem es profesor en las universidades de Amsterdam y de Stanford.

Bibliografía complementaria

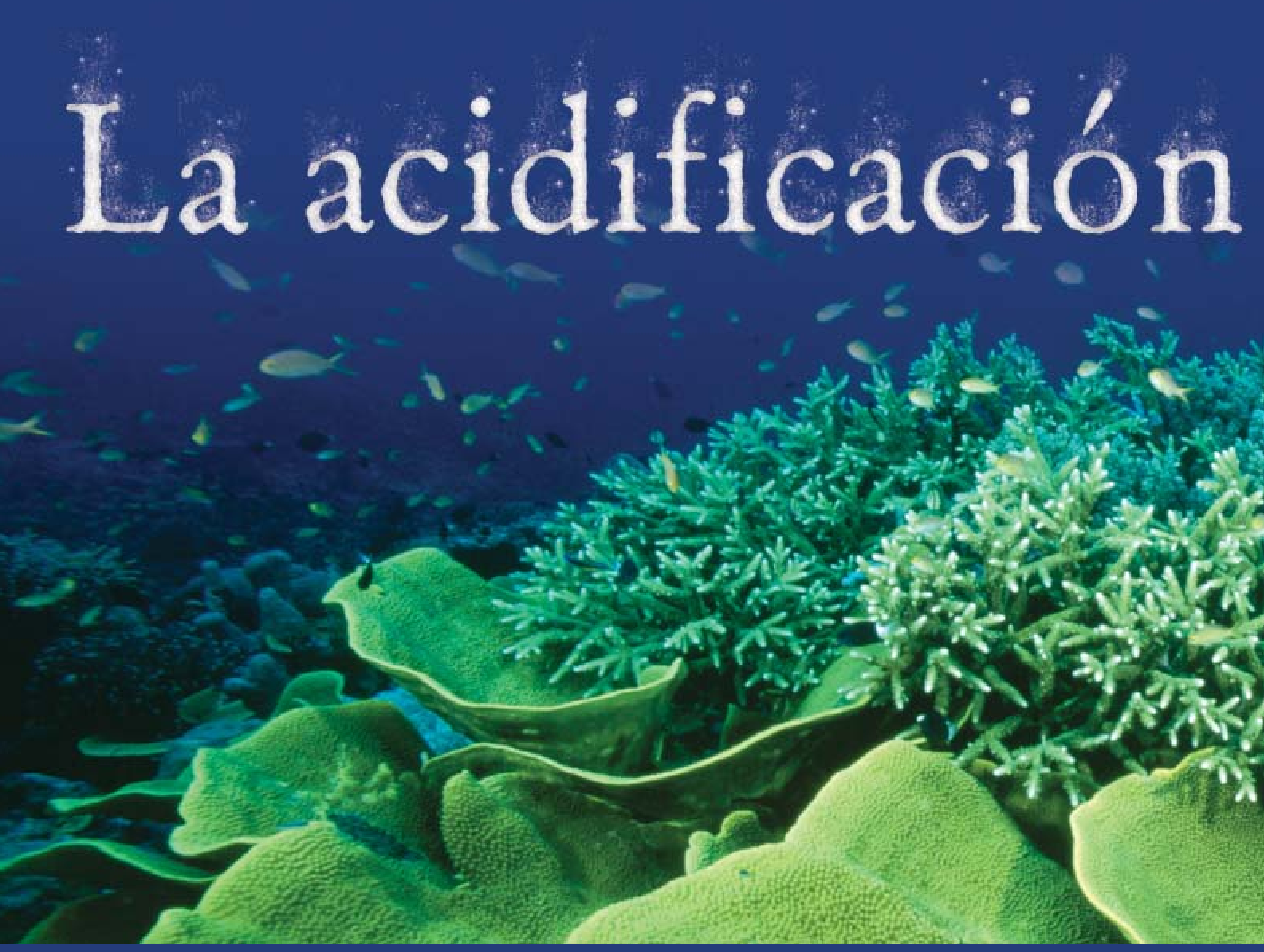
EXPLORING LOGICAL DYNAMICS. J. van Benthem. CSLI Publications; Stanford, 1996.

HANDBOOK OF LOGIC AND LANGUAGE. Dirigido por J. van Benthem y A. Ter Meulen. Elsevier; Amsterdam, 1997.

HANDBOOK OF MODAL LOGIC. Dirigido por P. Blackburn, J. van Benthem y F. Wolter. Elsevier; Amsterdam, 2005.

OPEN PROBLEMS IN GAME LOGICS. J. van Benthem. ILLC; Amsterdam, 2005.

La acidificación



Buena parte del dióxido de carbono liberado por la quema de combustibles fósiles El fenómeno repercute en la estabilidad de la vida marina

En 1956, Roger Revelle y Hans Suess, de la Institución Scripps de Oceanografía, señalaron la necesidad de medir el dióxido de carbono en la atmósfera y en el océano, para conocer los efectos ejercidos sobre el clima por la intensa producción industrial de dióxido de carbono en el transcurso de los próximos 50 años. En otras palabras, se proponían hacerse una idea de la gravedad de la situación actual. Hoy nos sorprende que tuvieran que justificar la importancia de dichas observaciones, pero en aquella época se desconocía si el dióxido de carbono que arrojaban los tubos de escape y las chimeneas se acumularía en la atmósfera. Algunos creían que el mar lo absorbería sin complicaciones o que lo fijarían las plantas sin problemas.

Revelle y el joven investigador al que contrató para este proyecto, Charles David Keeling, se percataron de que debían instalar equipos en puntos remotos, lejos de las fuentes y sumideros de dióxido de carbono, que introducirían una variación errática en las mediciones. Uno de los enclaves seleccionados se hallaba en la zona más alejada de cualquier actividad industrial y exenta de vegetación: el polo sur. Otro, en una estación meteorológica recién instalada en la cima del volcán Mauna Loa, en Hawai.

El seguimiento del Mauna Loa ha continuado desde 1958 hasta la actualidad, con una breve interrupción. Menos distante que la Antártida, Hawai registra subidas y bajadas manifiestas en el nivel de dióxido de carbono, de acuerdo con la estación de crecimiento

FRED BAVENDAM *Minden Pictures*



acaba en el océano, con la consiguiente alteración de la acidez del medio.

Scott C. Doney

1. LOS ARRECIFES DE CORAL, con la extraordinaria biodiversidad asociada, sufren el asedio de múltiples factores de estrés ambiental. Entre otros, la exposición a sustancias tóxicas y la destrucción física directa. Una amenaza menos conocida, pero quizá de mayor importancia, corresponde a la alteración del equilibrio químico oceánico causada por la quema de combustibles fósiles. En la actualidad, un tercio del dióxido de carbono que se libera en la combustión va a parar al océano, que sufre entonces una reducción del *p*H, alcalino en su situación habitual. Semejante cambio hacia condiciones más ácidas dificulta el crecimiento de los corales y de muchos otros organismos marinos.

vegetal del hemisferio norte. Sin embargo, al final de cada año, la concentración de este gas de invernadero termina siendo mayor que la que había 12 meses antes. La comunidad científica no tardó en darse cuenta de que Revelle tenía razón: buena parte del dióxido de carbono liberado a la atmósfera permanecía allí. Pero sus cálculos acertaban también en otra predicción: una fracción sustancial del gas terminaría en el mar. Según Revelle, la parte que se disolvería en el océano provocaría graves alteraciones en el equilibrio químico del medio marino. A diferencia de otros aspectos del cambio climático, la realidad de la acidificación del océano apenas ha generado debate. Sus implicaciones empiezan a revelarse ahora.

Sumideros del CO_2 antropogénico

El registro de Keeling, que abarca medio siglo, muy valioso, resulta demasiado corto para colocar la situación actual en un contexto histórico. Para lograr una perspectiva más amplia se han medido las burbujas de aire atrapadas en testigos de hielo. Merced a ese archivo natural, se ha descubierto que la concentración atmosférica de dióxido de carbono fue aproximadamente constante a lo largo de miles de años, para iniciar un rápido ascenso desde el comienzo de la industrialización en el siglo XIX. Hoy, ese gas es un 30 por ciento más abundante que la cuantía existente siglos atrás. Se espera que duplique o triplique su nivel anterior a finales de este siglo.

Este suministro creciente de carbono procede en gran parte de la quema de combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. También la producción de cemento y la quema de bosques tropicales añaden cierta cantidad de carbono; no obstante, en aras de la claridad pasaremos por alto estas contribuciones secundarias.

A diferencia de los constituyentes de los organismos vivos, los combustibles fósiles contienen muy poca cantidad, si alguna, de carbono 14. Este isótopo radiactivo posee ocho neutrones en el núcleo, no los seis de la forma común. Los combustibles fósiles presentan una proporción singular de carbono 12 y 13, los dos isótopos estables del carbono. La combustión de estos combustibles deja, pues, una rúbrica isotópica distintiva en la atmósfera; no hay lugar, pues, para dudar de dónde procede el excedente creciente de dióxido de carbono.

Las tasas de absorción varían. Hoy en día, alrededor del 40 por ciento del dióxido de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles permanece en la atmósfera; el resto lo absorbe la vegetación terrestre o el océano en proporciones iguales. La cantidad de carbono fósil que va a parar al mar representa, por ahora, una pequeña adición al ingente depósito natural de este elemento. Por ello, el estudio y la cuantificación de la absorción requieren mediciones precisas, aptas para detectar concentraciones de al menos una parte por cada 1000. Puesto que las cantidades varían de forma notable de un lugar a otro, la tarea requiere asimismo recursos y perseverancia para cartografiar la concentración de carbono en todo el mundo. Esto es exactamente lo que hicieron los oceanógrafos desde finales de los años ochenta y a lo largo del decenio siguiente, en el marco de las evaluaciones globales JGOFS (de “Joint Global Ocean Flux Study”, Estudio Global Conjunto del Flujo Oceánico) y WOCE (de “World Ocean Circulation Experiment”, Experimento de Circulación Oceánica Mundial).

Sin embargo, estos proyectos no distinguieron qué fracción del carbono medido es natural y qué cuantía procede del dióxido de carbono antropogénico. En 1996, Nicolas Gruber, de la Universidad de California en Los Angeles, desarrolló, con dos compañeros más, una técnica innovadora. De la aplicación del método de Gruber a todos los datos de JGOFS y WOCE (ejercicio que se completó en 2004) se deduce que el océano ha absorbido la mitad de todo el carbono fósil liberado a la atmósfera desde el inicio de la Revolución Industrial.

Otra manera de registrar este proceso consiste en realizar mediciones repetidas de carbono en el mismo sector del océano. Debe el carbono de origen fósil distinguirse del procedente de fuentes biológicas marinas. Las observaciones han de cubrir un decenio o más para identificar el efecto de la quema de combustibles fósiles frente al fondo de variabilidad natural. En 2005, junto con Rik Wanninkhof, de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA), emprendimos una campaña experimental de este tipo.

Con un equipo de 31 científicos, técnicos y estudiantes a bordo de nuestro buque de investigación, pasamos casi dos meses tomando medidas de las propiedades físicas y químicas de las aguas del Atlántico Sur occidental, de la superficie al fondo. Desde la vecindad de la Antártida procedíamos hacia las proximidades del ecuador. La misma sección de océano que otros expertos y yo habíamos estudiado en 1989.

Comparamos los datos de 2005 con los recogidos 16 años antes. Encontramos que, en los primeros centenares de metros del Atlántico Sur, la concentración actual de carbono es, en general, superior a la del pasado reciente. Ello concuerda con la hipótesis de que el océano está absorbiendo dióxido de carbono atmosférico. Se han observado tendencias semejantes también en los océanos Pacífico e Indico. Pero, ¿cuáles son los efectos de esta absorción en el medio marino?

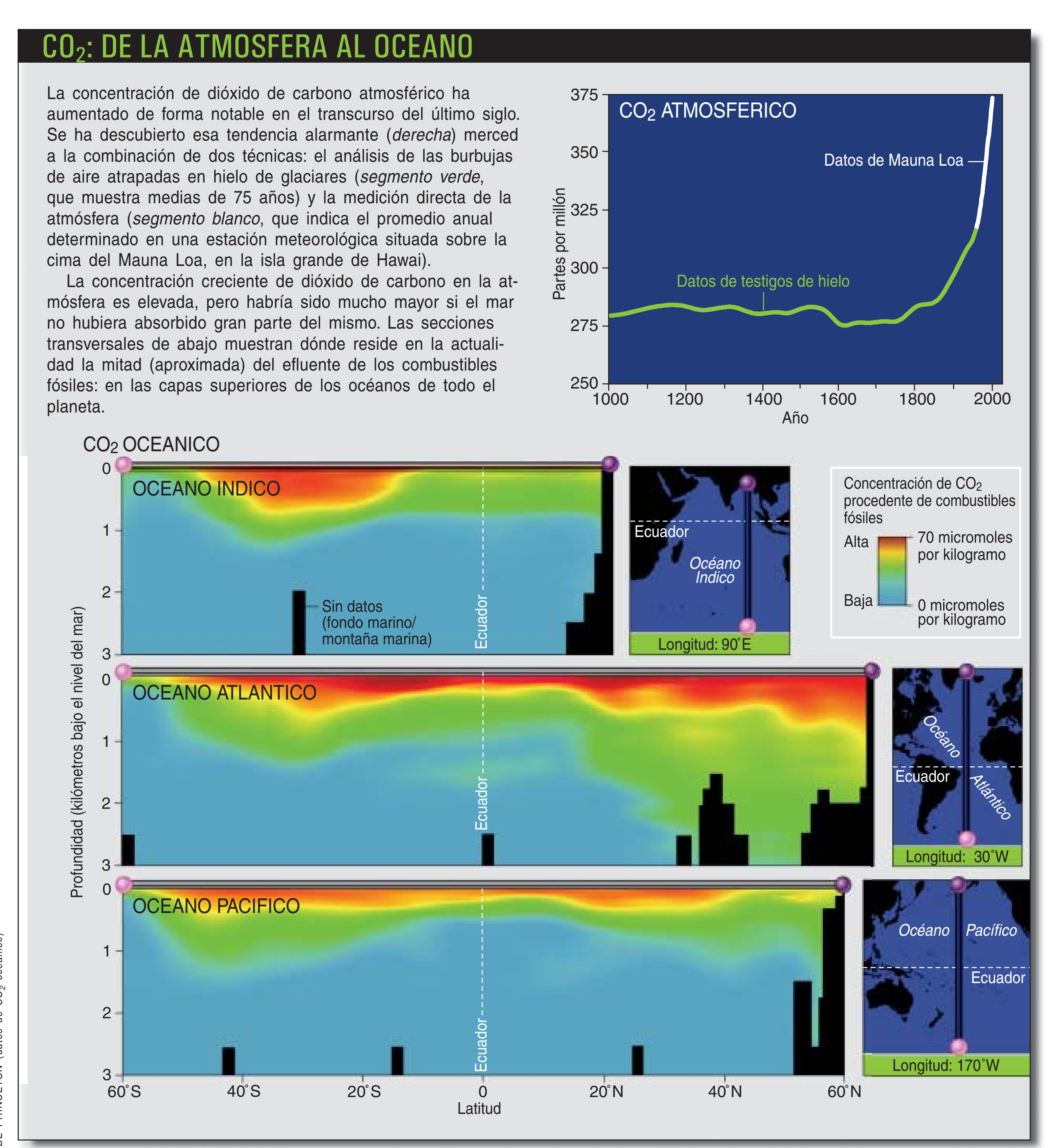
Resumen/El CO_2 en el océano

- Alrededor de un tercio del dióxido de carbono (CO_2) liberado por la quema de combustibles fósiles termina en el océano.
- En el agua, el CO_2 absorbido forma ácido carbónico, que hace descender el *p*H (ligeramente alcalino) y altera el equilibrio de iones carbonato y bicarbonato.
- La acidificación y los cambios químicos subsiguientes dificultan la formación de las partes duras de carbonato cálcico de los organismos marinos. Así, la reducción del *p*H amenaza a una amplia variedad de organismos, entre los que se cuentan los corales, que sostienen algunos de los hábitats con mayor biodiversidad del planeta.
- De aquí a cien años, la superficie del océano Austral se habrá vuelto corrosiva para las conchas de caracoles diminutos, que constituyen un eslabón decisivo en la cadena alimentaria de esta zona de productividad elevada.

Química oceánica básica

Para comprender las alteraciones que este fenómeno produce en el medio oceánico es necesario revisar algunos conceptos básicos sobre el equilibrio químico. El dióxido de carbono (CO_2) se combina con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3), el mismo ácido débil que se encuentra en las bebidas carbónicas. Como todos los ácidos, el carbónico libera iones hidrógeno (H^+) en solución, produciendo iones bicarbonato (HCO_3^-) y, en menor cantidad, iones carbonato (CO_3^{2-}). Una pequeña fracción del ácido carbónico permanece sin disociarse; lo mismo ocurre con una pequeña cantidad del dióxido de carbono. De estos equilibrios resulta una mezcla compleja de compuestos de carbono y iones.

CO_2: DE LA ATMOSFERA AL OCEANO



La concentración de dióxido de carbono atmosférico ha aumentado de forma notable en el transcurso del último siglo. Se ha descubierto esa tendencia alarmante (*derecha*) merced a la combinación de dos técnicas: el análisis de las burbujas de aire atrapadas en hielo de glaciares (*segmento verde*, que muestra medias de 75 años) y la medición directa de la atmósfera (*segmento blanco*, que indica el promedio anual determinado en una estación meteorológica situada sobre la cima del Mauna Loa, en la isla grande de Hawai).

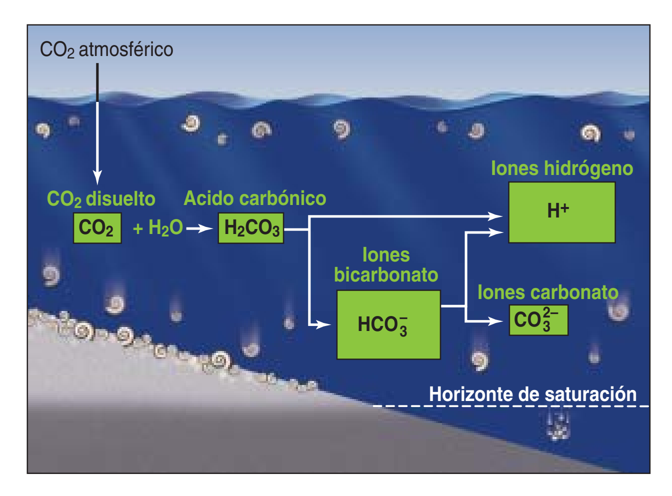
La concentración creciente de dióxido de carbono en la atmósfera es elevada, pero habría sido mucho mayor si el mar no hubiera absorbido gran parte del mismo. Las secciones transversales de abajo muestran dónde reside en la actualidad la mitad (aproximada) del efluente de los combustibles fósiles: en las capas superiores de los océanos de todo el planeta.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: CENTRO DE ANALISIS DE LA INFORMACION DEL DIOXIDO DE CARBONO, LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE (http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.dat y http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp001/maunaloa.co2) (*datos de CO_2 atmosférico*); ROBERT KEY UNIVERSIDAD DE PRINCETON (*datos de CO_2 oceánico*)

De los procesos de disolución y disociación resulta un aumento de la concentración de iones hidrógeno, que se cuantifica mediante la escala de *p*H. Una reducción de una unidad de *p*H corresponde a un aumento de diez veces en la concentración de iones hidrógeno, lo que hace que el agua se torne más ácida; un aumento en una unidad de *p*H, en cambio, corresponde a una reducción de diez veces en la concentración de iones hidrógeno, que hace que el agua sea más alcalina. El *p*H neutro (el del agua pura) es de 7. El *p*H del agua de mar prístina oscila entre 8 y 8,3: el océano es, por naturaleza, algo alcalino.

La absorción del dióxido de carbono ha hecho ya que el *p*H actual de las aguas superficiales sea inferior en unas 0,1 unidades (menos alcalino) al de la época preindustrial. A menos que modifiquemos pronto y de forma drástica el consumo de combustibles fósiles, el *p*H oceánico se reducirá en un 0,3 adicional hacia 2100. Ken Caldeira, de la Institución Carnegie de Washington, prevé que dentro de algunos siglos el *p*H oceánico alcanzará los valores más bajos de los últimos 300 millones de años. Una predicción sin duda preocupante.

Aunque puedan parecer pequeñas, estas variaciones del *p*H resultan alarmantes. De acuerdo con experimen-



2. EL DIOXIDO DE CARBONO de la atmósfera se absorbe y se combina con el agua para formar ácido carbónico. Una parte de este compuesto persiste como tal. La fracción mayor, sin embargo, se disocia en iones hidrógeno acidificantes y iones bicarbonato. Algunos de éstos se disocian, a su vez, en iones carbonato y más iones hidrógeno. Los cambios químicos mencionados producen un desplazamiento hacia arriba del "horizonte de saturación" para la calcita y el aragonito (nivel oceánico profundo por debajo del cual las conchas y caparazones constituidos por estos minerales se disuelven).

tos recientes, tales modificaciones perjudicarán a ciertas formas de vida marinas; en particular, a los organismos que dependen de la presencia de iones carbonato para la fabricación de sus conchas o caparazones (u otras partes duras) a partir de carbonato cálcico ($CaCO_3$).

La preocupación resulta un tanto paradójica. Si parte del dióxido de carbono absorbido por el mar se disocia en iones carbonato, cabe esperar que exista gran concentración de los mismos, superior a la que habría si ello no ocurriera. Pero no ocurre tal: los iones hidrógeno creados tienden a combinarse con iones carbonato para formar iones bicarbonato. El resultado neto corresponde así a una reducción en la concentración de iones carbonato.

El inconveniente estriba en que un descenso del *p*H (y, por ende, de la concentración de iones carbonato, que se supone caerá a la mitad en el transcurso del siglo recién iniciado) impedirá que determinados organismos produzcan carbonato cálcico, con las dificultades consiguientes para su propio desarrollo. De manera singular se verían afectados los cocolitofóridos, componentes del fitoplancton. Recubiertos de diminutas placas de carbonato cálcico, esos abundantes organismos se hallan próximos a la superficie oceánica, donde aprovechan la luz solar para realizar la fotosíntesis. Otros ejemplos de interés son los foraminíferos (animales planctónicos unicelulares emparentados con las amebas) y los pterópodos (pequeños caracoles marinos). Estos organismos diminutos constituyen una fuente de alimento importante para peces y mamíferos marinos, entre ellos algunas especies de ballenas.

Se teme también por los corales. Pese a su aspecto vegetal, son colonias animales. Están emparentados con las anémonas de mar. Se alimentan, por filtración, del plancton. Secretan esqueletos de carbonato cálcico, que con el tiempo se acumulan para formar los arrecifes de coral, uno de los ecosistemas de mayor productividad y diversidad biológicas del océano. Algas coralinas (algas que también secretan carbonato cálcico y a menudo presentan el aspecto de corales) contribuyen a la calcificación de numerosos arrecifes. El Gran Arrecife Barrera (la mayor estructura biológica del mundo), frente a la costa australiana, por ejemplo, se ha creado con la acumulación, generación tras generación, de corales y algas coralinas. A mayores profundidades se encuentran comunidades de corales de aguas frías que tapizan los márgenes continentales y las montañas submarinas, formando hábitats de máximo interés para los peces.

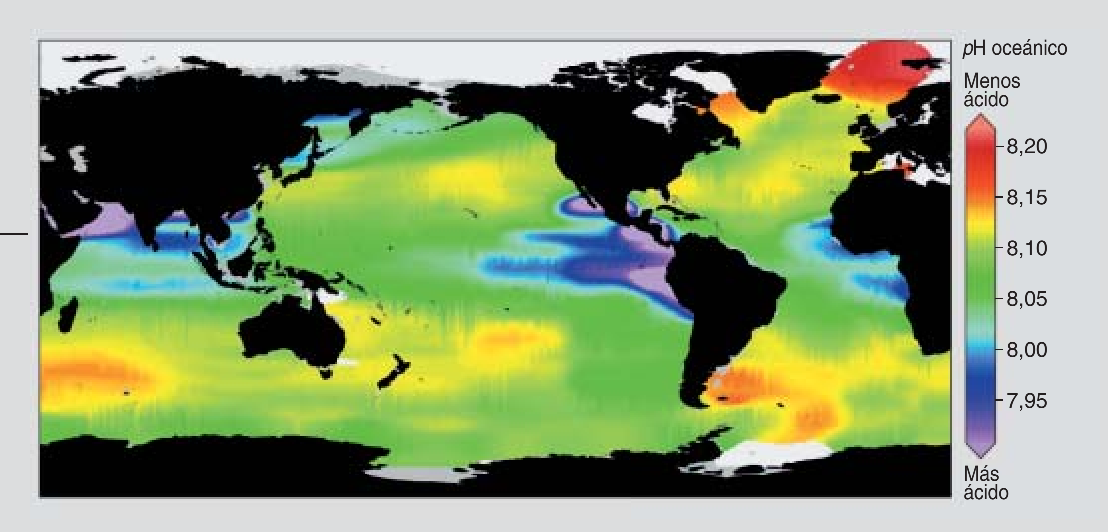
Los corales de aguas someras deben sus hermosos colores, en parte, a algas simbiontes, que medran en el interior de las células del coral. Acontece que, en

JEN CHRISTIANSEN (*arriba*); CHRIS SABINE NOAA *Pacific Marine Environment Laboratory* (*abajo*)

LA ACIDEZ CAMBIANTE DE LOS OCEANOS

Mediciones efectuadas en los 50 metros superiores de los océanos revelan que el *p*H varía de forma notable de un lugar a otro. Se espera que el *p*H oceánico disminuya en los años venideros.

Las áreas con *p*H bajo (más ácidas) se deben al afloramiento natural de aguas más profundas. En estas regiones, como el Pacífico ecuatorial oriental, podrían hallarse enclaves adecuados para el estudio de los efectos que se espera que dominen en el futuro en zonas más extensas.



respuesta a diversos factores de estrés ambiental, las algas abandonan a sus huéspedes y dejan expuesto el blanco esqueleto de carbonato cálcico subyacente. Este “blanqueo” se produce, por ejemplo, en situaciones de calor extremo. Se sospecha que la acidificación del océano (o, más exactamente, su reducción de alcalinidad) tiende a provocar el mismo efecto.

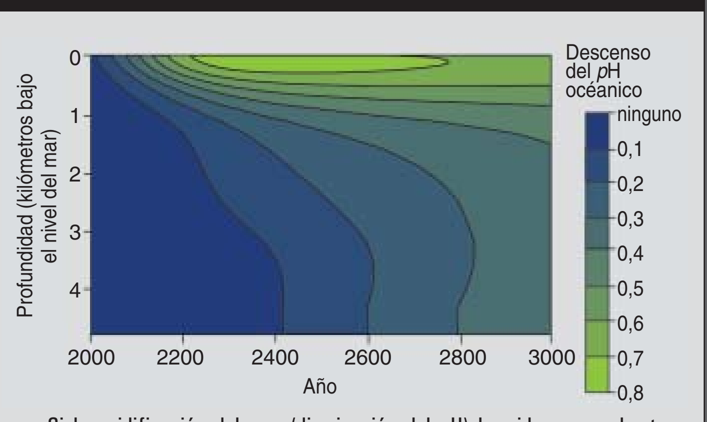
La supervivencia del más grueso

Pero la repercusión de la acidificación en corales y otros organismos marinos que se calcifican podría adquirir mayor gravedad. Podrían desintegrarse conchas y caparazones. Si el lector necesita una demostración de la magnitud del problema, introduzca un pedazo de creta (carbonato cálcico) en un vaso de vinagre (un ácido débil) y observe lo que ocurre: la creta empezará a disolverse de inmediato. Para conocer mejor la distinta vulnerabilidad de las especies ante tamaña agresión, convendrá exponer otra lección de química.

En los corales o en los caparazones de otros organismos marinos el carbonato cálcico se presenta en dos formas minerales: calcita y aragonito. Algunos organismos secretores de calcita añaden magnesio a la mezcla. El aragonito y la calcita con magnesio son más solubles que la calcita normal. Por tanto, los corales y los pterópodos, que producen esqueletos y conchas de aragonito, y las algas coralinas, que fabrican calcita con magnesio, se hallan especialmente expuestos al daño ocasionado por la acidificación del océano.

La solubilidad del carbonato cálcico depende, sobre todo, de la concentración de iones carbonato (y, por tanto, de forma indirecta, del *p*H). Depende, además, de otras variables; por citar dos, la temperatura y la presión. En las condiciones actuales, las aguas profundas y frías de numerosas regiones poseen un grado de acidez suficiente para disolver los caparazones de carbonato cálcico. Se dice que están “subsaturadas”. Con respecto a la calcita y el aragonito, aplicamos el calificativo “supersaturadas” a las aguas de la fracción superficial, cálidas; con otras palabras, allí ambos minerales no tienden a disolverse.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: “ANTHROPOGENIC CARBON AND OCEAN pH”, POR K. CALDEIRA Y M. E. WICKETT EN *NATURE*, VOL. 425; 25 DE SEPTIEMBRE DE 2003



Si la acidificación del mar (disminución del *p*H) ha sido escasa hasta la fecha, será mayor en el futuro. Las alteraciones principales se experimentarán cerca de la superficie; a medida que pase el tiempo se dejarán sentir también a grandes profundidades.

La zona de transición entre condiciones supersaturadas y subsaturadas configura el “horizonte de transición”; por debajo de este nivel, conchas y caparazones empiezan a disolverse.

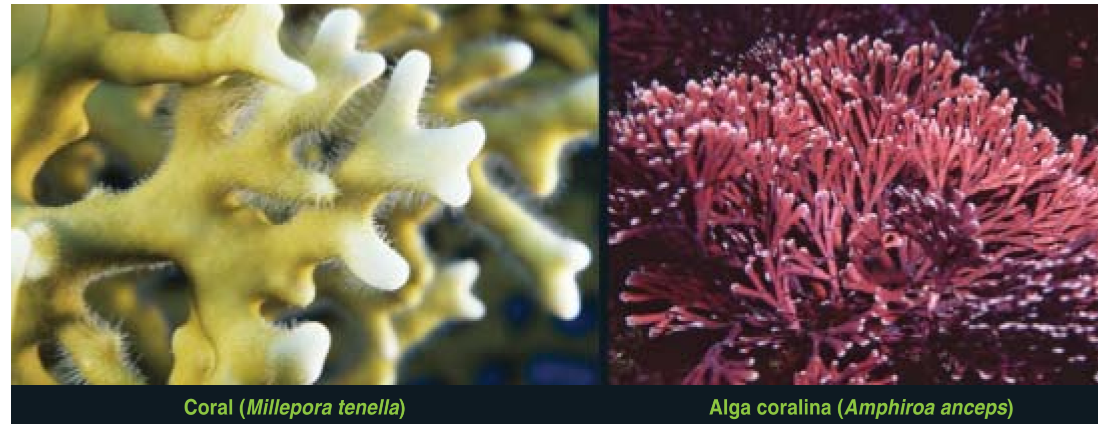
Las entradas de dióxido de carbono procedentes de la atmósfera han hecho que los horizontes de saturación para el aragonito y la calcita se hallen ahora de 50 a 200 metros más cerca de la superficie que en el siglo XIX. La investigación reciente prevé una mayor pérdida generalizada de profundidad de los horizontes de saturación en el transcurso de los próximos decenios. Conforme el océano se torna cada vez más ácido, la sección superior, favorable a los caparazones, se volverá más estrecha. La fracción de mar apta para la vida de los organismos que se calcifican será cada vez menor.

Creíase antaño que la acidificación del océano plantearía un problema de escasa entidad, habida cuenta de que las aguas superficiales seguirían estando supersaturadas; al menos en relación con la calcita, la forma robusta del carbonato cálcico. A finales de los años noventa del siglo pasado, Christopher Langdon, de la Universidad de Miami, realizó un experimento para someter a prueba la solidez de esa idea: alteró el equilibrio químico del agua sobre un arrecife de coral artificial instalado en un tanque del laboratorio Biosfera II, de la Universidad de Columbia. (La instalación, por incongruente que parezca, se encuentra en pleno desierto de Arizona.) Langdon observó que la tasa de producción de carbonato cálcico en los corales se reducía a *p*H inferiores, aunque el agua permaneciera supersaturada en relación con el aragonito. Poco después, el equipo que dirige Ulf Riebesell, del Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar y Marina, demostró una reducción similar en los cocolitofóridos planctónicos. Agréguese a ello que se han acometido otros experimentos de laboratorio que demuestran los efectos perjudiciales de un incremento de dióxido de carbono (y de la reducción de *p*H que éste produce) para los principales grupos de organismos marinos que poseen partes duras de carbonato cálcico.

Puesto que las aguas frías están menos supersaturadas que las cálidas para las diversas formas de carbonato cálcico, los ecosistemas de latitudes elevadas y de aguas profundas pueden ser los primeros en sufrir los efectos de la acidificación del océano. Con toda probabilidad, las aguas polares superficiales quedarán subsaturadas para el aragonito antes del final de este siglo. Según las investigaciones de Victoria J. Fabry, de la Universidad de California en San Marcos, existe una posibilidad todavía más inquietante: que los pterópodos polares desaparezcan. O quizá se vean obligados a migrar a latitudes inferiores y más cálidas, suponiendo que puedan adaptarse a los nuevos entornos. Nadie sabe de qué forma una merma importante en el número de pterópodos repercutirá en el ecosistema marino. Pero el hecho de que estos caracolillos constituyan un eslabón clave en la cadena alimentaria del océano Austral (que sostiene grandes poblaciones de peces, cetáceos y aves marinas) lo convierte en un motivo justificado de preocupación.

El fitoplancton y el zooplancton calcáreo de latitudes elevadas podrían compartir un destino similar, aunque su declive llegaría decenios más tarde, porque sus ca-

3. LOS ORGANISMOS MARINOS amenazados por la acidificación creciente del océano comprenden los corales y algas coralinas de las comunidades arrecifales, así como los foraminíferos y los cocolitofóridos, que abundan en las aguas superficiales. También los pterópodos, un grupo de caracolillos marinos, se encuentran en peligro, sobre todo en aguas frías polares.



Coral (*Millepora tenella*) Alga coralina (*Amphiroa anceps*)

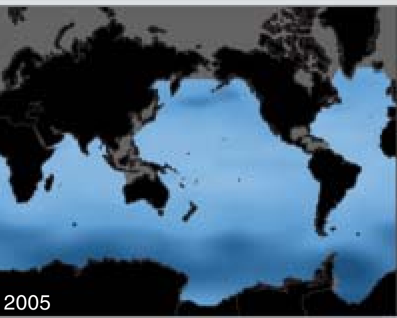
parazones y conchas son de calcita, la forma menos soluble de carbonato cálcico. Y cabe presumir que las comunidades de corales profundos sufrirán tales efectos, en particular las del Atlántico Norte occidental, a lo largo del recorrido del agua que contiene concentraciones elevadas de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles.

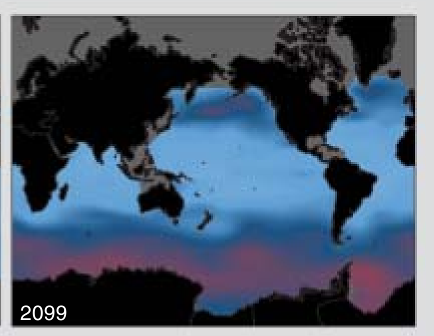
Más sombrías se anuncian las perspectivas para los arrecifes de coral. Para estos ecosistemas preciosos, la acidificación oceánica representa uno más entre los múltiples factores de estrés ambiental, incluidos el caldeamiento debido al efecto invernadero, la contaminación local, la sobrepesca y la destrucción del hábitat. En su mayoría, los arrecifes de coral se hallan en regresión;

EL FUTURO (CORROIDO) DEL ARAGONITO

Los niveles decrecientes de *p*H dificultarán la formación de las partes duras de algunos organismos marinos; las especies que lo notarán antes y con mayor intensidad serán las que para ello utilizan aragonito, la forma de carbonato cálcico más propensa a la disolución. El grado de la amenaza variará de una región a otra.

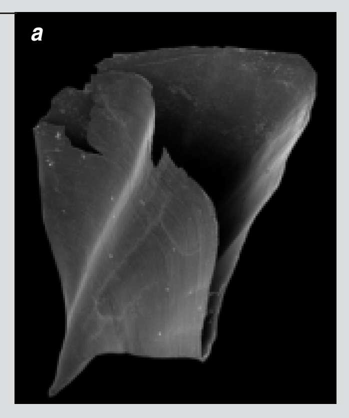


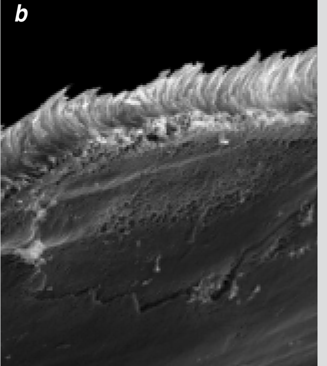


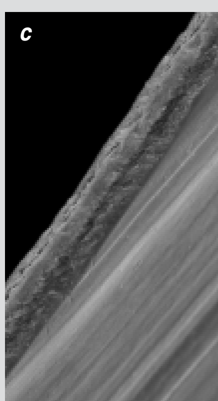


Antes de la Revolución Industrial (*izquierda*), la mayor parte de las aguas superficiales se hallaban “sobresaturadas” con respecto al aragonito (*azul claro*); ello permitía a los organismos marinos formar este mineral con facilidad. Ahora (*centro*), en cambio, el grado de sobresaturación de las aguas polares superficiales es sólo marginal (*azul oscuro*). Se espera que, a finales de siglo (*derecha*), estas aguas heladas, sobre todo las que rodean la Antártida, se hallen subsaturadas (*púrpura*), lo que dificultará la formación de aragonito y provocará la disolución del ya formado.

Los pterópodos constituyen un eslabón clave en la cadena alimentaria en todo el océano Austral. Para estos animales (y los que dependen de ellos), los cambios que se avecinan pueden resultar desastrosos, como sugieren las imágenes de la derecha. La concha de un pterópodo mantenida durante 48 horas en agua subsaturada con respecto al aragonito muestra corrosión en la superficie (*a*), que se ve más claramente a mayor aumento (*b*). La concha de un pterópodo sano no muestra disolución (*c*).







ALEXIS ROSENFELD *Photo Researchers, Inc.* (*coral de fuego*); KEOKI STENDER *Fishpics Hawaii* (*alga coralina*); INSTITUCION OCEANOGRAFICA DE WOODS HOLE (*foraminífero*); STEVE GSCHMEISSNER *Photo Researchers, Inc.* (*cocolitofórido*); RUSS HOPCROFT *Universidad de Alaska-Fairbanks/NOAA* (*pterópodo*); JAMES C. ORR *Laboratorio de la Ciencia del Clima y del medioambiente, UMR CEA-CNRS, Francia* (*mapa y concha de pterópodo*)



Foraminífero (*Globigerina bulloides*) Cocolitofórido (*Emiliania huxleyi*) Pterópodo (*Limacina helicina*)

la acidificación oceánica puede empujar a algunos de ellos hacia la desaparición.

Evaluación del impacto ecológico

Aunque las condiciones previstas resultarán perjudiciales para organismos marinos de muy diversa estirpe, habrá quienes saldrán beneficiados. Sólo una exigua fracción del carbono que hay en el agua de mar se halla en forma de dióxido de carbono disuelto. Tal restricción limita el crecimiento de ciertos tipos de fitoplancton, especies que invierten una cantidad notable de energía en asimilar el dióxido de carbono. Puede aventurarse, pues, que sacarán partido del aumento del dióxido de carbono disuelto. Con todo, este efecto de "fertilización" no se conoce lo suficiente para hacer predicciones en firme sobre el futuro del fitoplancton o para declarar que unos niveles superiores de dióxido de carbono terminarán por beneficiar a las algas fotosintéticas que medran en el interior de los corales. Muchas especies de fitoplancton utilizan el HCO_3^- para la fotosíntesis. Puesto que la concentración de este ion permanecerá apenas alterada, no se espera que los organismos en cuestión experimenten un aumento importante. Algunas plantas superiores (las fanerógamas marinas, por ejemplo) explotan directamente dióxido de carbono disuelto; con toda probabilidad, se beneficiarán del aumento de su concentración, de la misma forma que se espera que las plantas terrestres salgan ganando con la mayor presencia de este gas en la atmósfera.

¿Cómo podemos afinar la evaluación de la respuesta de los ecosistemas oceánicos a la acidificación? La mayoría de los estudios en este campo incluyen experimentos de laboratorio a corto plazo y con una sola especie en cada caso. Se han proyectado también estudios de campo a pequeña escala para examinar los efectos graves que acompañarían el vertido intencionado de dióxido de carbono atmosférico en el mar profundo, una de las diversas estrategias tomadas en consideración para secuestrar el dióxido de carbono e impedir que pase al aire [*véase* "Almacenamiento del dióxido de carbono bajo tierra", de R. H. Socolow; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2005]. Sin desdeñar su valor, no entran en las consecuencias de una exposición, persistente y a largo plazo, a un *p*H ligeramente inferior. Ni debemos extrapolar resultados obtenidos en un laboratorio a ecosistemas enteros, donde intervienen organismos de especies muy diversas.

Una evaluación más realista del sistema se lograría mediante elevación artificial de los niveles de dióxido de carbono durante meses o años en un retazo de océano o de arrecife de coral. En tierra firme se realizan experimentos que implican la manipulación a gran escala de los niveles de dióxido de carbono; pero apenas si ha empezado a explorarse la aplicación de tales métodos al océano. Otra táctica se basa en estudiar de qué manera se desenvuelven los organismos marinos en zonas con un *p*H bajo desde hace tiempo. Tal es la situación de las islas Galápagos, bañadas por aguas ricas en dióxido de carbono.

Una tercera estrategia podría consistir en examinar el registro geológico de épocas en las que las concentraciones de dióxido de carbono alcanzaron niveles muy superiores a los actuales y, muy inferior, el *p*H oceánico. Ello ocurrió durante un intervalo insólitamente cálido que tuvo lugar hace unos 55 millones de años (el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno); desaparecieron entonces numerosos organismos marinos. El problema actual es que la acidificación se está produciendo a una velocidad alarmante (superior a la de cualquier evento pasado), que no deja margen de tiempo para que las especies oceánicas se adapten. Aunque ocultas a la vista de la mayoría, la drástica alteración del medio oceánico acarreará graves consecuencias para la vida marina.

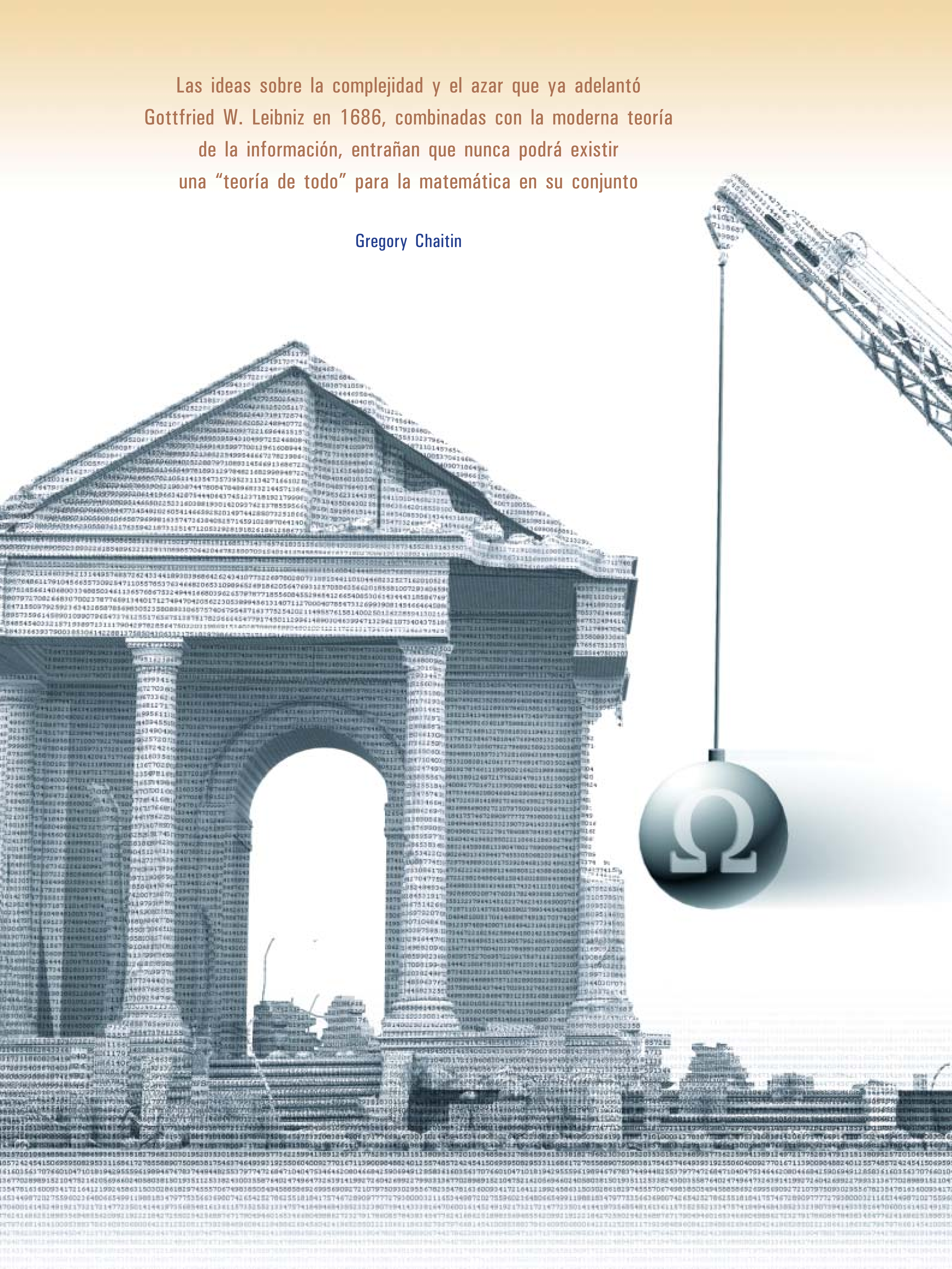
El autor

Scott C. Doney realiza su labor investigadora en el departamento de química y geoquímica marinas de la Institución Oceanográfica de Woods Hole. Preside el Grupo Científico Directivo de Carbono Oceánico y Cambio Climático, integrado en el Programa de Investigación de los EE.UU. sobre el Cambio Climático.

Bibliografía complementaria

ANTHROPOGENIC CARBON AND OCEAN PH. Ken Caldeira y Michael E. Wickett en *Nature*, vol. 425, pág. 365; 25 septiembre, 2003.

ANTHROPOGENIC OCEAN ACIDIFICATION OVER THE TWENTY-FIRST CENTURY AND ITS IMPACT ON CALCIFYING ORGANISMS. James C. Orr *et al.* en *Nature*, vol. 437, págs. 681-686; 29 septiembre, 2005.



Las ideas sobre la complejidad y el azar que ya adelantó Gottfried W. Leibniz en 1686, combinadas con la moderna teoría de la información, entrañan que nunca podrá existir una "teoría de todo" para la matemática en su conjunto

Gregory Chaitin

Los límites de la razón

Scientific American incluyó en 1956 un artículo de Ernest Nagel y James R. Newman titulado "Gödel's Proof" (La demostración de Gödel). Estos autores publicaron un libro de igual título dos años después, una obra maravillosa que todavía está en catálogo. Por aquel entonces yo era un niño —ni siquiera un adolescente— y estaba obsesionado con ese librito. Aún recuerdo la emoción con que lo descubrí en la Biblioteca Pública de Nueva York. Solía llevarlo conmigo y trataba de explicárselo a los otros niños.

Mi fascinación se debía a que Kurt Gödel se hubiese valido de las matemáticas para demostrar los límites de las propias matemáticas. Gödel refutaba la posición de David Hilbert, quien hace aproximadamente un siglo declaraba que había una "teoría de todo" para la matemática, un conjunto finito de principios a partir de los cuales se podrían deducir de manera mecánica, aplicando tediosamente los principios de la lógica simbólica, todas las verdades matemáticas. Pero Gödel demostró que las matemáticas contienen enunciados verdaderos que no es posible probar mediante tal proceder. Su resultado se funda en dos paradojas autorreferenciales: "Este enunciado es falso" y "Este enunciado es indemostrable".

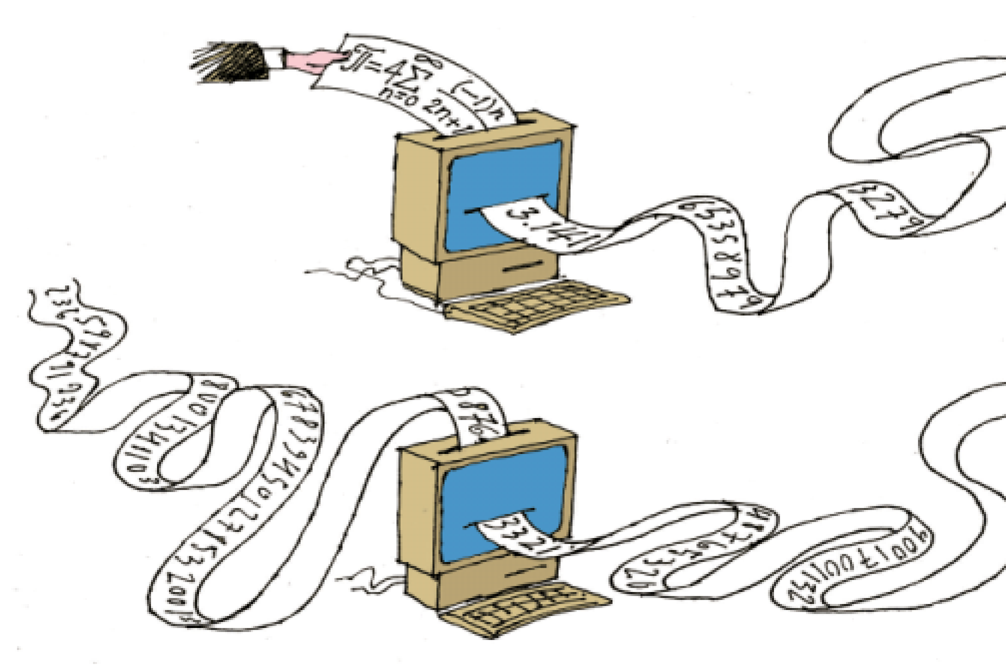
El propósito de comprender la demostración de Gödel se apoderó de mi vida, y ahora, medio siglo después, he publicado un librito de mi cosecha. Es, en ciertos aspectos, mi propia versión del libro de Nagel y Newman, pero no se centra en la demostración de Gödel. Las únicas cosas que ambos libros tienen en común son su pequeño tamaño y su intención de criticar los métodos matemáticos.

A diferencia del de Gödel, mi enfoque se basa en la medición de la información, con el propósito de hacer ver que determinados hechos matemáticos no pueden quedar condensados en una teoría porque son demasiado complejos. Según esta forma de proceder, lo que Gödel descubrió fue sólo la punta del iceberg: existe un número infinito de teoremas matemáticos que son verdaderos pero no pueden demostrarse a partir de un sistema finito de axiomas.

KENN BROWN; SEGUN IDEA DE DUSAN PETRICIC

1. LA EXISTENCIA DE OMEGA (Ω), un número concreto, bien determinado, que ningún programa de ordenador podría calcular, echa por tierra toda esperanza de alcanzar una matemática completa, cada uno de cuyos hechos ciertos sea verdadero por alguna razón.

La complejidad y las leyes científicas



DUSAN PETRICIC

Empecemos en 1686, con un ensayo filosófico de Gottfried W. Leibniz, el *Discours de métaphysique*, donde se examina cómo cabe distinguir entre los hechos que admiten descripción mediante alguna ley y aquellos otros que son irregulares y no atienden a ley alguna. La idea de Leibniz, tan sencilla como profunda, figura en la Sección VI de su *Discours:* una teoría ha de ser más sencilla que los hechos que explica, pues de lo contrario no explica nada. El concepto de ley se torna vacuo si se permite que su complejidad matemática sea arbitrariamente grande: sin esa restricción, siempre se puede construir una ley por muy aleatorios y desestructurados que sean los datos. Recíprocamente, si la única ley que describe ciertos datos es una ley complicadísima, lo que realmente ocurre es que los datos no obedecen a una ley.

En nuestros días, las nociones de complejidad y de simplicidad se han plasmado en términos cuantitativos precisos merced a una moderna rama de las matemáticas, la teoría algorítmica de la información. En la teoría ordinaria, cuantifican la información los bits (dígitos binarios) necesarios para codificarla. Por ejemplo, para codificar la respuesta a una disyuntiva "sí/no" se necesita un bit. En cambio, en la teoría algorítmica la cuantificación viene dada por el tamaño mínimo de un programa informático que genere los datos. El número mínimo de bits —el tamaño de la lista de unos y ceros— necesarios para almacenar el programa recibe el nombre de contenido de información algorítmica de los datos. Así, por ejemplo, la sucesión indefinida de los números naturales (1, 2, 3,...) posee muy poca información algorítmica, pues un programa muy breve genera todos esos números. No importa cuánto tarde el programa en efectuar un cómputo ni cuánta memoria haya de utilizar: tan sólo cuenta la longitud del programa, expresada en bits. (Dejo de lado la cuestión del lenguaje de programación utilizado para redactar el programa; para lograr una definición rigurosa, tal lenguaje debería especificarse con precisión. Con lenguajes de programación diferentes, los valores de contenido de información algorítmica serían un tanto distintos.)

Veamos otro ejemplo. El número pi, cuyo valor es 3,14159... tiene también un contenido de información algorítmica pequeño, porque es posible programar en un ordenador algoritmos no muy largos que irán calculando sus sucesivos dígitos. En cambio, un número aleatorio que conste de un millón de dígitos, digamos 1,341285...64, tiene un contenido de información algorítmica mucho mayor. Dado que no existe una regla para la obtención de sus cifras, la extensión del programa más corto capaz de generarlo será aproximadamente igual a la longitud del propio número:

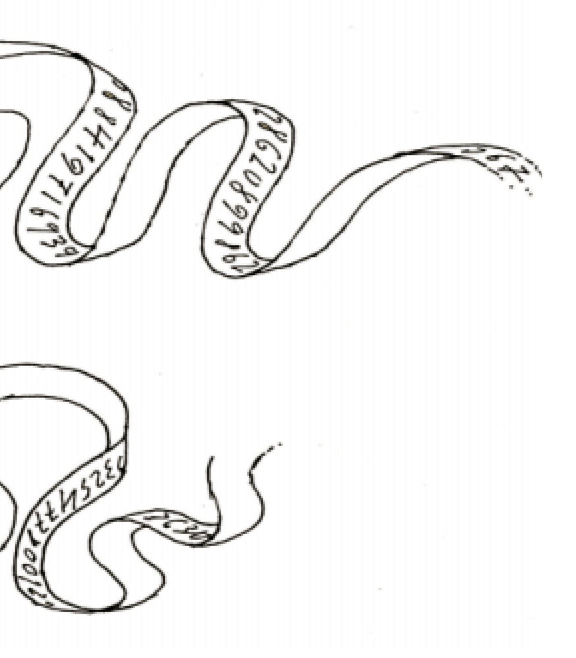
```
Comienzo
Imprime "1,341285...64"
Fin
```

(La totalidad de los dígitos representados por los puntos suspensivos figuran en el programa.) No puede haber un programa más corto capaz de calcular esa sucesión de dígitos. Dicho de otro modo, ristras de dígitos así son "incompresibles", no poseen redundancia; lo más que podemos hacer es transmitirlas directamente. Se dice que son irreducibles, o algorítmicamente aleatorias.

¿Qué relación guardan estas nociones con las leyes y hechos científicos? Cabe concebir la ciencia como una forma de "programación informática": una teoría científica vendría a ser un programa informático capaz de predecir las observaciones, los datos experimentales. Dos prin-

Resumen/Complejidad irreducible

- Kurt Gödel demostró que la matemática es necesariamente incompleta: contiene enunciados verdaderos que no pueden demostrarse mediante procedimientos formales. El llamado número omega revela la existencia de una incompletitud de mayor magnitud: proporciona un número infinito de teoremas que no pueden demostrarse a partir de ningún sistema finito de axiomas. En consecuencia, es imposible que exista una "teoría de todo" para la matemática.
- Omega es un número bien definido y tiene un valor concreto, pero no puede computarse mediante ningún programa informático finito.
- Las propiedades de omega sugieren que los matemáticos deberían ser menos reacios a postular nuevos axiomas, tal y como los físicos evalúan sus resultados experimentales y formulan leyes básicas que no pueden demostrarse por medios puramente lógicos.
- Los resultados relativos a omega se fundan en el concepto de información algorítmica. Gottfried W. Leibniz anticipó muchas de las propiedades de la información algorítmica hace ya más de 300 años.



2. LA INFORMACION ALGORITMICA cuantifica el tamaño de un programa de ordenador necesario para producir un resultado determinado. El contenido algorítmico del número pi es pequeño, porque basta un breve programa para calcularlo. Un número aleatorio tiene muchísima información algorítmica: lo más que podemos hacer es introducir en el programa el propio número. Otro tanto vale para el número omega.

cipios fundamentales informan esta concepción. El primero (la "navaja de Occam") establece que, como señaló Guillermo de Occam, de dos teorías que expliquen los datos se ha de preferir la más sencilla. Es decir, la teoría óptima sería el programa mínimo que calculase las observaciones. El segundo es la idea de Leibniz, vertida en moldes modernos: una teoría de igual tamaño que los datos que pretende explicar carece de valor, porque incluso la colección de datos más aleatoria cuenta con una teoría de su mismo tamaño. Una teoría útil es una compresión de los datos: la comprensión es compresión. Comprimimos cosas convirtiéndolas en programas informáticos, en descripciones algorítmicas concisas. Cuanto más breve es la teoría, tanto mejor comprendemos lo que explica.

La razón suficiente

A pesar de que Leibniz vivió 250 años antes de la invención de los programas de ordenador, se aproximó mucho a la idea moderna de información algorítmica. Disponía de todos los elementos esenciales; no llegó a conectarlos. Sabía que todo era representable con información binaria, llegó a construir una de las primeras máquinas calculadoras, valoró mucho la potencia de la computación y filosofó sobre la complejidad y la aleatoriedad.

De haber llegado Leibniz a ensamblar todos estos elementos, podría haber puesto en tela de juicio uno de los pilares básicos de su propia filosofía, a saber: el principio de razón suficiente, el principio de que todo ocurre por alguna razón. Además, si algo es verdadero, debe serlo por alguna razón. A veces, este principio puede resultar difícil de creer, visto el caos y la confusión de la vida cotidiana, del flujo y reflujo contingentes de la historia humana. Pero Leibniz sostenía que aunque no siempre se nos alcance tal razón (tal vez, porque la cadena de razonamientos es larga y sutil), Dios sí puede verla: ¡ahí está! En eso coincidía con los antiguos griegos, los creadores de esa idea.

Los matemáticos, desde luego, creen firmemente en la razón y en el principio de Leibniz de razón suficiente, pues siempre procuran demostrarlo todo. Poco importa cuántos sean los indicios de veracidad de un teorema, su comprobación en millones de casos: los matemáticos exigirán una demostración formal del caso general. Sólo ella les contentará.

Y aquí es donde la noción de información algorítmica puede efectuar su sorprendente aportación al debate filosófico de los orígenes y los límites del conocimiento. Revela que ciertos hechos matemáticos son verdaderos sin que exista razón para ello, un descubrimiento que contraviene claramente el principio de razón suficiente.

Como haré ver más abajo, existe una colección infinita de hechos matemáticos irreducibles, es decir, tales que no existe teoría alguna que explique por qué son verdaderos. Esos hechos no sólo son computacionalmente irreducibles: son lógicamente irreducibles. La única forma de "demostrarlos" consiste en aceptarlos directamente como nuevos axiomas, sin razonamiento alguno.

El concepto de "axioma" está íntimamente emparentado con la idea de irreductibilidad lógica. Los axiomas son hechos matemáticos que admitimos como evidentes por sí mismos, y que no tratamos de demostrar a partir de principios más sencillos. Todas las teorías matemáticas formales parten de un sistema de axiomas y deducen sus consecuencias, es decir, los teoremas. Así procedió Euclides de Alejan-

La definición de omega

Para comprender cómo se define el valor del número omega conviene el examen de un ejemplo simplificado. Supongamos que el ordenador con el que estamos tratando tiene solamente tres programas que se detienen, y que éstos se componen de las series de dígitos binarios 110, 11100 y 11110. Estos programas tienen, respectivamente, 3, 5 y 5 bits de longitud. Si construimos programas al azar, lanzando una moneda para determinar cada uno de sus bits, la probabilidad de obtener por azar cada uno de esos tres programas que se detienen será $\frac{1}{2}^3$, $\frac{1}{2}^5$ y $\frac{1}{2}^5$, porque cada dígito binario concreto tiene probabilidad ½. Por consiguiente, el valor de omega (la probabilidad de detención) para este ordenador concreto está dado por la igualdad:

$$\text{omega} = \tfrac{1}{2}^3 + \tfrac{1}{2}^5 + \tfrac{1}{2}^5 = 0{,}001 + 0{,}00001 + 0{,}00001 = 0{,}00110$$

Este número (que está expresado en el sistema binario) es la probabilidad de acertar por azar con alguno de los tres programas; es, por consiguiente, la probabilidad de que nuestro ordenador llegue a detenerse. Se ha de señalar que, dado que el ordenador se detiene con el programa 110, no se consideran los programas que empiecen por 110 y tengan más de tres bits; no se toman en consideración, por ejemplo, los programas 1100 o 1101. Es decir, no se añaden a la suma anterior los sumandos correspondientes a esos dos programas, que valdrían 0,0001. Consideramos pues que la totalidad de los programas más largos, como 1100 y demás, están incluidos en la detención correspondiente a 110. Otra forma de decir lo mismo es que los programas son autodelimitantes: cuando provocan la detención, dejan de solicitar nuevos bits.

FISICA: TEORIA → CALCULOS → PREDICCIONES PARA LAS OBSERVACIONES
MATEMATICAS: AXIOMAS → RAZONAMIENTOS → TEOREMAS
INFORMATICA: PROGRAMA → EJECUCION EN UN ORDENADOR → RESULTADOS

DUSAN PETRICIC

3. LA FISICA Y LAS MATEMATICAS se asemejan en muchos aspectos a la ejecución de un programa en un ordenador.

dría hace más de dos mil años, y su tratado de geometría, los *Elementos*, sigue constituyendo el modelo clásico de exposición matemática.

En la Grecia antigua, cuando alguien quería que sus conciudadanos votasen de cierta manera sobre una determinada cuestión, tenía que razonárselo. Presumo que ésta fue la causa de que los griegos dieran con la idea de que en matemáticas había que demostrar las cosas, en lugar de descubrirlas empíricamente. Parece ser, en cambio, que culturas anteriores, como las de Mesopotamia y Egipto, confiaban en los experimentos. No cabe duda de que el uso de la razón ha sido un método de fecundidad extraordinaria, que ha conducido hasta la matemática y la física matemática de nuestros días y a todo lo que ambas han traído consigo, entre otras cosas la construcción de esa máquina tan lógica y matemática, el ordenador.

Así pues, ¿estoy diciendo que la metodología seguida por la ciencia y las matemáticas durante más de dos milenios se ha estrellado y se consume en llamas? Pues sí, en cierto sentido sí. El contraejemplo que ofrezco para ilustrar el limitado poder de la lógica y la razón, mi manantial del que brota una corriente interminable de hechos matemáticos indemostrables, es el número al que doy el nombre de "Omega".

El número omega

El primer paso por la senda que lleva a omega se dio en un famoso artículo publicado exactamente 250 años después del ensayo de Leibniz. En uno de los números de 1936 de *Proceedings of the London Mathematical Society*, Alan M. Turing inauguraba la era de la informática al presentar un modelo matemático de ordenador digital programable, sencillo y apto para cualquier tipo de aplicaciones. Seguidamente, Turing se preguntaba: ¿resulta posible determinar si un programa de ordenador llega, o no, a detenerse? Este es el famoso "problema de la detención" de Turing.

Claro está, una vez empezada la ejecución del programa, basta esperar lo suficiente para comprobar que el programa se detiene, si es que llega a hacerlo. El problema —de una importancia absolutamente fundamental— consiste en saber cuándo se ha de abandonar un programa que no se detiene. Resulta posible resolver un gran número de casos particulares, pero Turing demostró que es imposible hallar una solución general. Ningún algoritmo, ninguna teoría matemática podrán llegar a decirnos qué programas llegarán a detenerse y cuáles no. Cuando hablo de "programa", me refiero a la concatenación del programa del ordenador y de los datos que el programa ha de ir leyendo.

El paso siguiente del camino hacia omega consiste en considerar el conjunto de todos los programas posibles. ¿Llegará a detenerse un programa elegido al azar? La probabilidad de que así ocurra es mi número omega. Pero primero he de especificar cómo se elige un programa al azar. Un programa no es más que una serie de bits. Para determinar cada bit lanzaremos una moneda. ¿De cuántos bits ha de constar el programa? Volveremos a lanzar la moneda cada vez que el programa solicite un nuevo bit de datos. Omega no es más que la probabilidad de que la máquina llegue a detenerse cuando se le suministra una ristra de bits aleatorios de esa forma. (El valor preciso de omega depende de la elección del lenguaje de programación del ordenador, pero esa elección no afecta a las sorprendentes propiedades de omega. Y una vez seleccionado un lenguaje de programación, omega tiene un valor bien definido, lo mismo que el número pi o el número 3.)

Omega, una probabilidad, tiene que ser mayor que 0 y menor que 1, porque algunos programas se detienen y otros no. Imaginemos el número omega expresado en binario. Obtendríamos algo así como 0,1110100... Estos bits situados tras la coma forman una ristra irreducible de bits. Son hechos matemáticamente irreducibles (cada hecho consiste en que el bit sea 0 o 1).

Omega puede definirse como una suma infinita, a la que cada programa de N bits que se detiene aporta exactamente $1/2^N$. Dicho de otro modo, cada programa de N bits que se detiene añade un 1 al N-ésimo bit de la expresión binaria de omega. Súmense todos los bits correspondientes a todos los programas que se detienen, y se tendrá el valor exacto de omega. Esta descripción puede hacer pensar que cabe calcular omega con precisión, como si fuera la raíz cuadrada de 2 o el número pi. No es así: omega está perfectamente bien definido y es un número específico, pero resulta imposible computarlo en su totalidad.

Podemos tener la seguridad de que no se puede computar omega, porque si lo conociéramos estaría resuelto el problema de Turing de la detención, del que sabemos que es insoluble. Más concretamente, si conociéramos los primeros N bits de omega, nos sería posible decidir si cada programa de longitud menor o igual que N bits llega a detenerse. Se sigue de aquí que, para calcular N bits de omega, se necesita un programa de al menos N bits.

Nótese que no estoy diciendo que sea imposible computar algunos dígitos de omega. Por ejemplo, si supiéramos que los programas 0, 10, y 110 se detienen, sabríamos que los primeros dígitos de omega serían 0,111. Lo esencial es que los primeros N dígitos de omega no pueden calcularse mediante un programa

cuya longitud sea significativamente menor de N bits.

Y lo que es de máxima importancia: omega nos proporciona un número infinito de estos bits irreducibles. Dado un programa finito cualquiera, por muchos miles de millones de bits de longitud que tenga, tendremos un número infinito de bits que el programa no puede calcular. Dado un número finito de axiomas, tendremos un número infinito de verdades indemostrables en ese sistema.

Por ser omega irreducible, podemos concluir inmediatamente que es imposible la existencia de una "teoría de todo" que abarque la matemática entera. Es infinito el número de bits de omega —de hechos matemáticos (que cada bit sea un 0 o un 1) por lo tanto— que no pueden deducirse de principios más sencillos que la propia secuencia de bits. Así pues, la matemática tiene complejidad infinita, mientras que una posible teoría de todo tendría sólo una complejidad finita y no podría capturar el mundo completo de la verdad matemática.

Esta conclusión no significa que las demostraciones no valgan de nada; desde luego, no estoy en contra de la razón. Que algunas cosas sean irreducibles no significa que debamos renunciar a valernos de razonamientos. Los principios irreducibles —los axiomas— han constituido siempre una parte de las matemáticas. Lo que omega pone de manifiesto es que hay muchos más de lo que se sospechaba.

Así pues, los matemáticos quizá no deban esforzarse en demostrarlo todo. A veces deberían, sencillamente, añadir nuevos axiomas. Ante hechos irreducibles, es lo que debe hacerse. ¡El problema consiste en darse cuenta de que son irreducibles! En cierto sentido, afirmar que algo es irreducible equivale a darse por vencido, a decir que nunca podrá ser demostrado. Pero los matemáticos prefieren morir a ceder, en claro contraste con sus colegas físicos, quienes se contentan con ser pragmáticos y valerse de razonamientos verosímiles en lugar de demostraciones rigurosas. Los físicos están dispuestos a añadir nuevos principios, nuevas leyes científicas, con tal de comprender nuevos dominios de la experiencia. Lo cual suscita una cuestión que me parece del mayor interés: ¿es la matemática como la física?

Las matemáticas y la física

Según la opinión tradicional, la matemática y la física son bastante diferentes. La física describe el universo y depende de la observación y la experimentación. Las leyes específicas de nuestro universo —sean las leyes newtonianas de la dinámica o el modelo estándar de la física de partículas— han de determinarse empíricamente, y una vez así determinadas, se las enuncia como axiomas, no susceptibles de demostración lógica, sino de una mera verificación.

La matemática, en cambio, es en cierta forma independiente del universo. Sus resultados y teoremas, como las propiedades de los números enteros o de los números reales, no dependen de la naturaleza particular de la realidad en que nos encontramos. Las verdades matemáticas serían verdaderas en cualquier universo.

Y, sin embargo, ambas disciplinas se parecen no poco. En la física, y en general en todas las ciencias, las observaciones experimentales se comprimen en leyes científicas. Después se muestra que las observaciones pueden deducirse de esas leyes. También en la matemática ocurre algo similar: los matemáticos comprimen sus experimentos computacionales en axiomas matemáticos, y después indican la forma de deducir teoremas a partir de estos axiomas.

Si Hilbert hubiera estado en lo cierto, las matemáticas serían un sistema cerrado, sin espacio para ideas nuevas. Habría una "teoría de todo" para la matemática entera, una teoría cerrada, estática: una especie de dictadura. El progreso de las matemáticas exige ideas nuevas y mucho espacio para la imaginación. No basta con sudar y deducir mecánicamente



5. GOTTFRIED W. LEIBNIZ, conmemorado por esta estatua de Leipzig, adelantó, hace más de 300 años, muchas de las propiedades de la moderna teoría de información algorítmica.



4. UNA TEORIA CIENTIFICA viene a ser un programa informático que pronostica nuestras observaciones del universo. Una teoría útil es una compresión de los datos: a partir de un pequeño número de leyes y ecuaciones resulta posible computar universos enteros de datos.

H. LANGE *zefa/Corbis* (*arriba*); DUSAN PETRICIC (*abajo*)

todas las consecuencias posibles de un número fijo de principios básicos. Prefiero con mucho un sistema abierto. No me gustan las formas rígidas y autoritarias de pensamiento.

Otro que también pensó que las matemáticas son como la física fue Imre Lakatos. Huyó de Hungría en 1956; en Inglaterra se dedicó a la filosofía de la ciencia. Allí acertó con una gran palabra, "cuasiempírico": aunque en matemáticas no se efectúan experimentos propiamente dichos, sí hay algo parecido. Según la conjetura de Goldbach, todo número par mayor que 2 es suma de dos números primos. A esta conjetura se llegó empíricamente, por la observación experimental de su veracidad para todos los números pares que se hayan examinado. La conjetura todavía no se ha demostrado, pero sí se la ha comprobado hasta 10^{14}.

A mi juicio, las matemáticas son cuasiempíricas. Con otras palabras: tengo la convicción de que las matemáticas se diferencian de la física, realmente empírica, pero no tanto como suele creerse.

He vivido tanto en el mundo de las matemáticas como en el de la física, y nunca me pareció que hubiera excesiva diferencia entre estas dos disciplinas. Es una cuestión de grado, de énfasis, pero no una diferencia absoluta. Al fin y al cabo las matemáticas y la física han evolucionado a la vez. Los matemáticos no deberían aislarse. No deberían privarse de fuentes caudalosas de ideas nuevas.

Nuevos axiomas matemáticos

La idea de optar por añadir nuevos axiomas no es ajena a las matemáticas. Tenemos un ejemplo en el postulado de las paralelas de la geometría euclídea: dada una recta y un punto no yacente en ella, hay una y sólo una recta que pase por el punto y no corte a la primera recta. Fueron muchos los geómetras que se esforzaron a lo largo de más de veinte siglos en averiguar si este postulado podía deducirse de los restantes axiomas de Euclides. No lo consiguieron. Finalmente, en el siglo XIX se concibió la idea de reemplazar el postulado de las paralelas por otros principios. Nacieron así las llamadas geometrías no euclídeas de espacios curvos, como las correspondientes a la superficie de una esfera o una silla de montar.

Tenemos otros ejemplos en la regla del "tercio excluso" en lógica y en el axioma de elección de la teoría de conjuntos. La mayoría de los matemáticos no tiene inconveniente en utilizar estos axiomas en sus demostraciones, pero no todos; éstos se aventuran, en cambio, en la llamada lógica intuicionista o en la matemática constructivista. ¡Las matemáticas no consisten en una estructura monolítica y única de verdad absoluta!

Otro axioma muy interesante puede ser la conjetura "P no es igual a NP". P y NP nombran clases de problemas. Un problema de tipo NP es un problema para el que se puede comprobar rápidamente si una presunta solución lo es verdaderamente. Por ejemplo, en el problema "Hállense los divisores de 8633" se puede comprobar enseguida que la

¿A qué se debe que omega sea incompresible?

Voy a demostrar que omega es incompresible, es decir, que no es posible utilizar un programa con un número de bits sustancialmente menor que N para calcular los primeros N dígitos binarios de omega. La demostración hará uso de una precisa combinación de propiedades de omega y del problema de Turing de la detención de programas, con el que está íntimamente emparentado. En concreto, me basaré en la propiedad de que el problema de la detención correspondiente a programas con una longitud máxima de N bits no puede ser resuelto por un programa que conste de menos de N bits.

Mi estrategia para demostrar que omega es incompresible consiste en demostrar que, si dispusiera de los primeros N bits de omega, sabría resolver el problema de Turing para programas de longitud máxima de N bits. Se sigue de aquí que ningún programa de longitud menor que N bits puede computar los N primeros bits de omega. (Pues de existir tal programa, podríamos utilizarlo para computar los N primeros bits de omega y utilizar después esos bits para resolver el problema de Turing de hasta N bits, tarea que es imposible para un programa tan corto.)

Veamos ahora por qué el conocimiento de N bits de omega nos permitiría resolver el problema de la detención —determinar qué programas llegarían a detenerse— para todos los programas de longitud menor o igual que N dígitos binarios. Lo hacemos efectuando una computación paso a paso, denotando el entero K el estadio en que nos encontramos: $K = 1, 2, 3,...$

En el estadio K, hagamos funcionar cada programa de longitud menor o igual que K durante K segundos, y calculemos una probabilidad de detención, a la que llamaré omega$_k$, basada en todos los programas que se detienen al llegar al estadio K. Omega$_k$ será menor que omega, porque solamente se basa en un subconjunto de los programas que llegarían a detenerse, mientras que omega se basa en la *totalidad* de dichos programas.

Al aumentar K, el valor de omega$_k$ irá aproximándose cada vez más al verdadero valor de omega, y cada vez será mayor el número de los primeros bits de omega$_k$ que serán correctos, es decir, iguales a los correspondientes bits de omega.

Y tan pronto como los primeros N bits sean correctos, sabremos que hemos encontrado todos los programas de longitud menor o igual que N que acabarán por detenerse. (Si hubiera algún otro de tales programas de N bits, en algún estadio posterior K se detendría, con lo que el valor de omega$_k$ sería mayor que el de omega, lo que es imposible.)

Podemos, pues, utilizar los primeros N bits de omega para resolver el problema de la detención para todos los programas de longitud menor o igual que N. Supongamos ahora que pudiéramos computar los primeros N bits de omega mediante un programa que fuese sustancialmente menor que N bits. Entonces podríamos combinar ese programa con el utilizado para realizar el algoritmo de omega$_k$ y producir así un programa de menos de N bits que resolvería el problema de Turing para programas de longitud menor o igual que N.

Pero, como se dijo de entrada, se sabe que no existe tal programa. Consiguientemente, el cómputo de los primeros N bits de omega ha de exigir un programa que tenga una longitud de casi N bits. Con eso basta para decir que omega es incompresible. (Una compresión desde N bits hasta casi N bits no es significativa para valores grandes de N.)

6. OMEGA REPRESENTA una parte de las matemáticas que es, en un cierto sentido, incognoscible. Un programa informático finito sólo puede revelar un número finito de dígitos de omega; el resto permanece envuelto en la oscuridad.



presunta solución “97 y 89” lo es verdaderamente sin más que multiplicar esos dos números. (Existe una definición técnica de “rápidamente”, pero esos detalles no son importantes para nuestro propósito.) Un problema P es un problema del que no se conoce previamente la solución pero que se puede resolver rápidamente. La pregunta —cuya respuesta se desconoce— es: ¿Podrá todo problema NP ser resuelto rápidamente? (¿Existe un procedimiento rápido para hallar los divisores de 8633?) O lo que es igual: ¿son la clase P y la NP una y la misma clase? Esta pregunta es uno de los “problemas del milenio” cuya solución merecería el Premio Clay, dotado con un millón de dólares.

Entre los científicos de la computación está muy difundida la convicción de que P no es igual que NP, pero no se dispone de ninguna demostración. Se podría decir que muchísimos indicios cuasiempíricos apuntan a que P no es igual que NP. ¿No se debería, entonces, aceptar como axioma que P no es igual que NP? Así lo han hecho, en efecto, los científicos de la computación. El problema guarda relación con la seguridad de ciertos sistemas criptográficos utilizados en todo el mundo. Se cree que tales sistemas son invulnerables, pero nadie puede demostrarlo.

Matemáticas experimentales

Otra faceta de la semejanza entre las matemáticas y la física se presenta en la llamada “matemática experimental”: el descubrimiento de nuevos resultados matemáticos mediante el examen de muchos ejemplos con la ayuda de los ordenadores. Aunque este método no resulte tan persuasivo como una demostración breve, puede manifestarse más convincente que una demostración larga y complicadísima; en algunos casos, resulta perfectamente suficiente.

En el pasado, Georg Pólya y Lakatos defendieron este enfoque con gran vigor, convencidos ambos del valor del razonamiento heurístico y de la naturaleza cuasiempírica de las matemáticas. También lo justifica y practica Stephen Wolfram en su libro *A New Kind of Science*, de 2002.

Aunque los grandes cálculos mediante ordenador puedan resultar muy persuasivos, ¿tornarán innecesarias las demostraciones? Sí y no. Proporcionan elementos de juicio de distinto tipo. Por mi parte, yo sostendría que en casos importantes se requieren ambos tipos de elemento de juicio, pues las demostraciones quizá contengan errores, mientras que las búsquedas mediante ordenador pueden tener la mala suerte de finalizar justo antes del contraejemplo que invalidaría el presunto resultado.

Todas estas cuestiones apasionantes distan de estar resueltas. Nos encontramos en 2006: han pasado 50 años de que *Scientific American* publicase su artículo sobre la demostración de Gödel, y todavía ignoramos la verdadera importancia de la incompletitud. No sabemos si la incompletitud nos está diciendo que debemos hacer una matemática un tanto diferente. Tal vez dentro de otros cincuenta años lo sepamos.

KENN BROWN; SEGUN IDEA DE DUSAN PETRICIC

El autor

Gregory Chaitin es investigador del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. Es profesor honorario de la Universidad de Buenos Aires y profesor visitante en la Universidad de Auckland. Creó, con Andrei N. Kolmogoroff, la teoría de información algorítmica.

Bibliografía complementaria

MEN OF MATHEMATICS. E. T. Bell. Reimpresión. Touchstone, 1986.

NEW DIRECTIONS IN THE PHILOSOPHY OF MATHEMATICS. Compilación de Thomas Tymoczko. Princeton University Press, 1998.

GÖDEL'S PROOF. Edición revisada. E. Nagel, J. R. Newman y D. R. Hofstadter. New York University Press, 2002.

MATHEMATICS BY EXPERIMENT: PLAUSIBLE REASONING IN THE 21ST CENTURY. J. Borwein y D. Bailey. A. K. Peters, 2002.

INCOMPLETENESS: THE PROOF AND PARADOX OF KURT GÖDEL. Rebecca Goldstein. W. W. Norton, 2005.

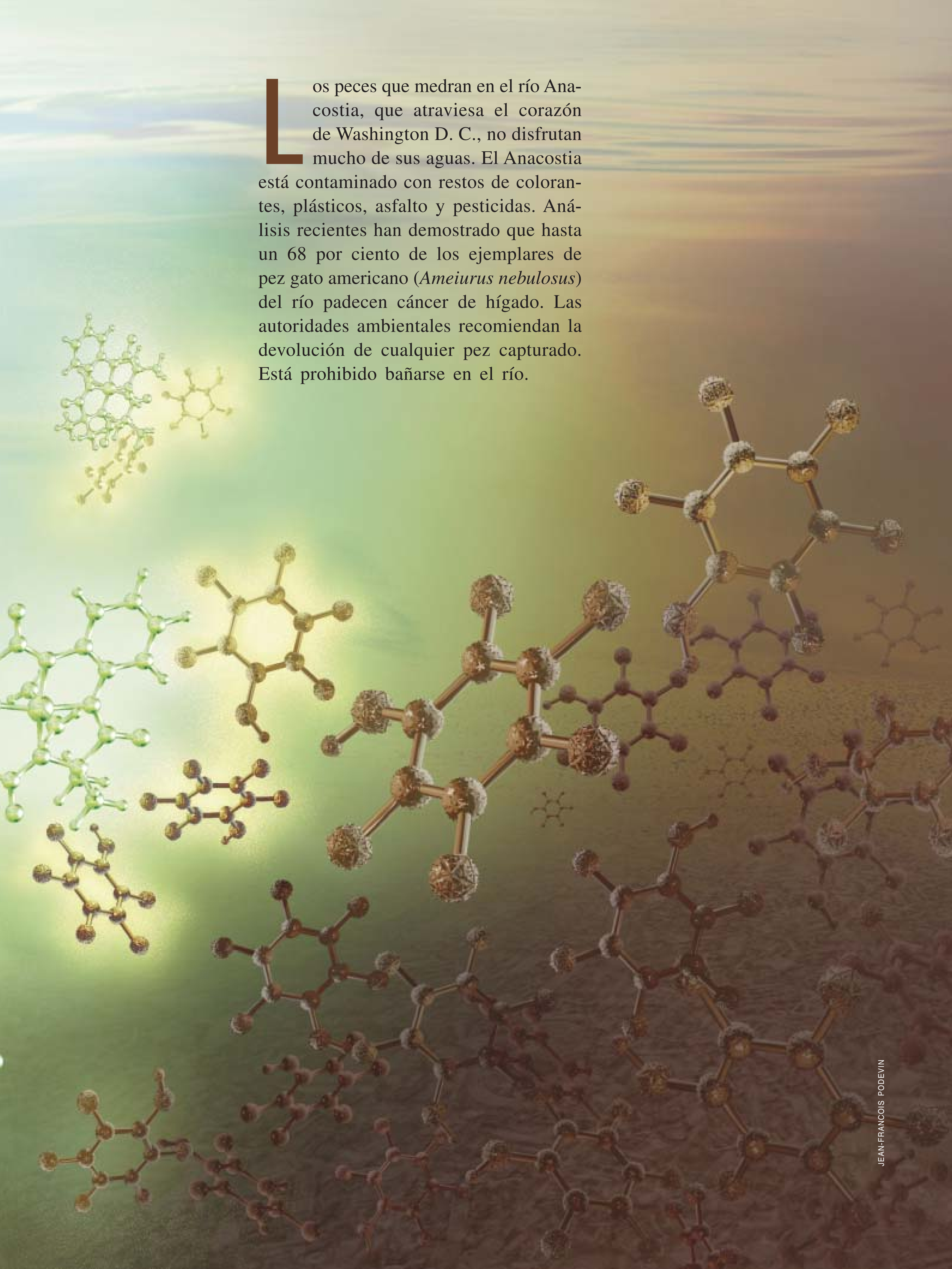
META MATH!: THE QUEST FOR OMEGA. Gregory Chaitin. Pantheon Books, 2005.

Moléculas limpiadoras

Un nuevo tipo de catalizadores destruye ciertos contaminantes insidiosos antes de que lleguen al ambiente

Terrence J. Collins y Chip Walter

1. CONTROL DE LA CONTAMINACION: los catalizadores LTAM (*verde*) participan, junto con el peróxido de hidrógeno (*azul*), en la descomposición de los clorofenoles (*marrón*), contaminantes presentes en las aguas residuales de numerosos vertidos industriales.



Los peces que medran en el río Anacostia, que atraviesa el corazón de Washington D. C., no disfrutan mucho de sus aguas. El Anacostia está contaminado con restos de colorantes, plásticos, asfalto y pesticidas. Análisis recientes han demostrado que hasta un 68 por ciento de los ejemplares de pez gato americano (*Ameiurus nebulosus*) del río padecen cáncer de hígado. Las autoridades ambientales recomiendan la devolución de cualquier pez capturado. Está prohibido bañarse en el río.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

El Anacostia es uno más entre las decenas de ríos contaminados de los Estados Unidos. Sólo la industria textil descarga cada año 200 hectómetros cúbicos de aguas residuales (que llevan colorantes reactivos y otros productos nocivos) en los ríos y arroyos estadounidenses. Están apareciendo nuevos contaminantes en el agua potable: trazas de fármacos, plaguicidas, cosméticos y hormonas para el control de la natalidad. Las cantidades son, a menudo, infinitesimales; se miden en partes por mil millones o partes por billón (una parte por mil millones viene a ser la concentración de un grano de sal disuelto en una piscina), pero se sospecha que bastan cantidades minúsculas de algunos contaminantes para alterar la bioquímica del desarrollo que determina el comportamiento, la inteligencia, la inmunidad y la reproducción humanas.

Por suerte, la ayuda está en camino. A lo largo de los últimos diez años, se han comenzado a considerar desde el emergente campo de la química verde los riesgos derivados de los procesos y productos químicos. Se han desarrollado sustitutos más seguros para pinturas y plásticos nocivos, así como nuevas técnicas de producción que reducen la emisión de contaminantes. Desde el Instituto de Química Verde de la Sociedad de Química Norteamericana nos recuerdan que es mejor evitar la producción de residuos que tratarlos o limpiarlos, una vez creados. Sin embargo, se ha avanzado también en el desarrollo de métodos para eliminar de las aguas residuales un repertorio muy amplio de contaminantes persistentes.

En el Instituto de Química de la Oxidación Verde de la Universidad Carnegie Mellon se ha diseñado un grupo de catalizadores particular. Llamados activadores LTAM (ligandos tetra-amido-macrocíclicos), intervienen junto con el peróxido de hidrógeno y otros oxidantes en la descomposición de una gama amplia de contaminantes persistentes. Estos catalizadores remedan las enzimas del organismo, que han evolucionado para combatir los compuestos tóxicos. En ensayos realizados en el laboratorio así como en el mundo real se ha demostrado que los LTAM destruyen plaguicidas tóxicos, colorantes y otros contaminantes, disminuyen el olor y la coloración de las aguas residuales procedentes de la industria papelera y matan esporas bacterianas similares a las de la cepa letal de carbunco. De generalizarse su uso, los LTAM podrían ahorrar millones de euros en gastos de limpieza. Además, esta investigación demuestra que la química verde restaña, en parte, el daño ambiental causado por la química tradicional.

Necesidad de la química verde

Si la situación de nuestro entorno resulta cada vez más apremiante es, en buena medida, porque el ser humano ha desarrollado procesos químicos distintos de los que operan en la naturaleza. En el transcurso del tiempo, los procesos bioquímicos han evolucionado a partir de elementos abundantes y accesibles (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, calcio y hierro) para originar de todo: desde paramecios hasta secuoyas, desde el pez payaso hasta el hombre. Nuestras industrias, en cambio, reúnen elementos procedentes de cualquier rincón del planeta y los distribuyen de una forma que jamás hubiese sido posible por medio de procesos naturales. El plomo, por ejemplo, solía encontrarse mayoritariamente en yacimientos aislados y remotos, de modo que jamás se incorporó (de forma natural) a los seres vivos. En la actualidad, sin embargo, este metal se encuentra por doquier; por una razón poderosa: las pinturas, los coches y los ordenadores lo han esparcido. Para los niños, incluso en dosis minúsculas, resulta extremadamente tóxico. Lo mismo puede decirse del arsénico, el cadmio, el mercurio, el uranio y el plutonio, elementos considerados contaminantes persistentes (no se degradan en el cuerpo de los animales o en el medio circundante). Existe, por tanto, una necesidad cada vez más acuciante de desarrollar una química alternativa más segura.

Algunas de las nuevas moléculas sintéticas que encontramos en medicamentos, plásticos y plaguicidas son tan distintas de los productos naturales, que parecen llegadas de otro planeta. Muchas de ellas no se degradan fácilmente. Al utilizarlos sin tasa, algunos compuestos biodegradables se han hecho omnipresentes; algunas de estas sustancias, se sabe ahora, alteran la expresión normal de genes implicados en el desarrollo del sistema reproductor masculino. Se conoce desde hace tiempo que la exposición prenatal a los ftalatos, compuestos empleados en plásticos y en productos de belleza, altera el aparato reproductor de los roedores macho recién nacidos. En 2005, Shanna H. Swan, de la facultad de medicina y odontología de la Universidad de Rochester, presentó un informe sobre la existencia de efectos similares en niños varones. En otro estudio, descubrió que los hombres con un recuento de espermatozoides bajo residentes en una zona rural de Missouri presentaban niveles elevados de herbicidas (alaclor y atrazina) en la orina. Desde fábricas, granjas y alcantarillas, los contaminantes persistentes viajan intactos por el aire o por el agua y se incorporan a la cadena alimentaria para regresar, con frecuencia, al ser humano.

Para hacer frente al problema, se está investigando la viabilidad de la sustitución de algunos de los productos y procesos de fabricación de mayor toxicidad por alternativas más ecológicas. El trabajo del equipo de

Resumen/Catalizadores limpiadores

- Colorantes, plaguicidas y otros contaminantes arrojados a las vías fluviales se han hecho tan omnipresentes, que plantean una grave amenaza contra la salud humana.
- Se han creado activadores con ligandos tetra-amido-macrocíclicos (LTAM). Estos catalizadores, semejantes a las enzimas, destruyen contaminantes persistentes mediante la aceleración de reacciones de limpieza con peróxido de hidrógeno.
- Cuando se aplican a las aguas residuales de fábricas papeleras, los LTAM reducen la concentración de colorantes y compuestos nocivos. Algún día, estos catalizadores podrán utilizarse también para desinfectar el agua potable y limpiar la contaminación provocada por ataques bioterroristas.

FABRICA TEXTIL
Tintes

FABRICA DE PAPEL
Fragmentos de lignina coloreados, compuestos organoclorados

GRANJA
Herbicidas, insecticidas, residuos de origen animal y medicinas

DESAGUES
Colorantes, cosméticos, fármacos

2. LA CONTAMINACION DEL AGUA proviene de muchas fuentes, pero los nuevos catalizadores LTAM pueden destruir algunos de los peores contaminantes antes de que lleguen a ríos y lagos. Por ejemplo, la aplicación de LTAM a las aguas procedentes de las industrias textil y papelera descompondría colorantes, compuestos organoclorados y otras sustancias nocivas. Los LTAM se utilizarían también en el tratamiento del drenaje de lagunas que almacenan residuos agrícolas así como de desagües domésticos, que contienen tintes procedentes de las lavadoras y trazas de productos farmacéuticos nocivos, eliminados a través de la orina humana.

Collins, en Carnegie Mellon, remonta sus orígenes hasta los años ochenta del siglo pasado, cuando se intensificó la preocupación por los efectos del cloro sobre la salud pública. En aquel entonces el cloro solía utilizarse —y todavía se utiliza— en la limpieza y desinfección a gran escala de fábricas así como en la potabilización del agua. Si bien efectivo y barato, el tratamiento con cloro origina algunos contaminantes de elevada toxicidad. El blanqueamiento de la pulpa de madera con cloro en la industria papelera constituyó una fuente importante de dioxinas cancerígenas hasta que la Agencia de Protección Ambiental estadounidense prohibió el proceso en 2001. (En la actualidad, la mayoría de las fábricas de papel blanquean la pulpa de madera con dióxido de cloro, que reduce la producción de dioxinas, aunque no las elimina.) También los subproductos generados por la cloración del agua potable se han asociado a ciertos tipos de cáncer. Las formas naturales más abundantes del cloro, los iones cloruro y las sales disueltas en agua, no resultan tóxicas; la forma elemental, en cambio, reacciona con otras moléculas y origina compuestos que alteran la química de los seres vivos. Las dioxinas, por ejemplo, interrumpen el desarrollo celular al interferir con un sistema receptor que regula la producción de proteínas clave.

En vez de depender del cloro, ¿por qué no utilizar productos de limpieza naturales (el peróxido de oxígeno y el oxígeno) en la purificación del agua y la reducción de los residuos industriales? Estos eliminan de forma eficiente y segura multitud de contaminantes; sin embargo, suelen requerir la participación de una enzima (catalizador bioquímico que incrementa enormemente la velocidad de una reacción). Sean éstos naturales o sintéticos, los catalizadores operan como las antiguas celestinas, pero en vez de facilitar relaciones amorosas entre personas, ponen en contacto moléculas, favoreciendo y acelerando reacciones químicas entre ellas. Algunos catalizadores naturales aumentan la velocidad de reacción miles de millones de veces. Si no fuese por la ptialina, una enzima presente en la saliva, nuestro cuerpo tardaría varias semanas en descomponer la pasta en sus azúcares constituyentes. Sin enzimas, la bioquímica transcurriría a cámara lenta. La vida, tal como la conocemos, no existiría.

En la naturaleza, las peroxidasas catalizan reacciones en las que interviene el peróxido de hidrógeno, el conocido producto químico doméstico que se utiliza para decolorar el vello o para eliminar manchas de las alfombras. En el bosque, los hongos que medran en los árboles en putrefacción utilizan peroxidasas para coordinar la descomposición de los polímeros de lignina de la madera mediante peróxido de hidrógeno, que



rompe las moléculas de gran tamaño en otras más pequeñas que los hongos puedan digerir. Otra familia de enzimas, los citocromos P450, cataliza reacciones en las que interviene el oxígeno (reacciones de oxidación). Los citocromos P450 de nuestro hígado, por ejemplo, utilizan el oxígeno para destruir un gran número de moléculas tóxicas que inhalamos o ingerimos.

Durante decenios, los químicos se han esforzado en sintetizar moléculas pequeñas y capaces de emular a estas enormes enzimas. Tales catalizadores de diseño ofrecerían una alternativa a los procesos de oxidación basados en cloro y metales, que generan abundante cantidad de contaminantes.

A principios de los años ochenta del siglo pasado, el desarrollo de estas enzimas "probeta" no había dado todavía ningún fruto. En el transcurso de miles de millones de años de evolución, la naturaleza había coreografiado algunas danzas catalíticas de extrema elegancia y complejidad. A su lado, nuestros esfuerzos en el laboratorio parecían torpes. No lograríamos reducir la contaminación a menos que encontrásemos una forma de remedar esa danza molecular.

Transformadores catalíticos

La creación de enzimas sintéticas implicaba también el ensamblaje de moléculas capaces de resistir las reacciones destructivas que debían catalizar. Cualquier proceso químico en el que interviene el oxígeno resulta destructivo porque los enlaces que éste establece con otros elementos (sobre todo con el hidrógeno) son muy fuertes. Dado que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se halla a mitad de camino entre el agua (H_2O) y el oxígeno molecular (O_2), este compuesto constituye también un potente agente oxidante. En agua, el peróxido de hidrógeno provoca a menudo una suerte de fuego líquido que arrasa las moléculas orgánicas circundantes (que contienen carbono). De los enzimas aprendimos que un catalizador eficiente debería contar con un átomo de hierro localizado en el centro de una matriz molecular de grupos orgánicos. Por tanto, teníamos que hacer más robusta la arquitectura molecular de estos grupos para asegurar su resistencia al fuego líquido que resultaría de la activación del peróxido de hidrógeno.

Inspirados en los diseños de la propia naturaleza, resolvimos por fin este problema mediante la creación de un catalizador en el que cuatro átomos de nitrógeno describen un cuadrado con un único átomo de hierro anclado en el centro. Los átomos de nitrógeno están unidos al átomo de hierro, más voluminoso, mediante enlaces covalentes (comparten pares de electrones). En este tipo de estructura, los átomos o grupos unidos al átomo metálico central se denominan ligandos. A continuación, conectamos los ligandos para formar un gran anillo externo: un macrociclo. Con el tiempo, aprendimos a aumentar la robustez de los ligandos y las estructuras de conexión para que resistieran las violentas reacciones desencadenadas por los LTAM. Así, obtuvimos ligandos que operaban a modo de cortafuegos resistente al fuego líquido. Cuanto más resistente, más útil resultaría el catalizador. Por supuesto, no pretendíamos crear un compuesto indestructible, pues, en ese caso, acabaría contaminando las aguas residuales. Todos los catalizadores Fe-LTAM (LTAM con un átomo de hierro en el centro) creados hasta la fecha se descomponen en una escala de tiempo que varía entre minutos y horas.

La obtención de los ligandos cortafuegos no resultó sencilla. Desarrollamos un proceso de diseño dividido en cuatro etapas. Primero, sintetizamos las combinaciones de ligandos que creíamos que mantendrían la integridad del cortafuegos. En segundo lugar, sometimos el catalizador a estrés oxidativo hasta que el cortafuegos se desintegró. Luego, buscamos el lugar por donde comenzó la descomposición. (La degradación de los ligandos comienza siempre por la zona de mayor vulnerabilidad.) Por fin, una vez detectado el punto débil, lo reemplazamos por grupos de átomos más resistentes y comenzamos de nuevo el ciclo de diseño.

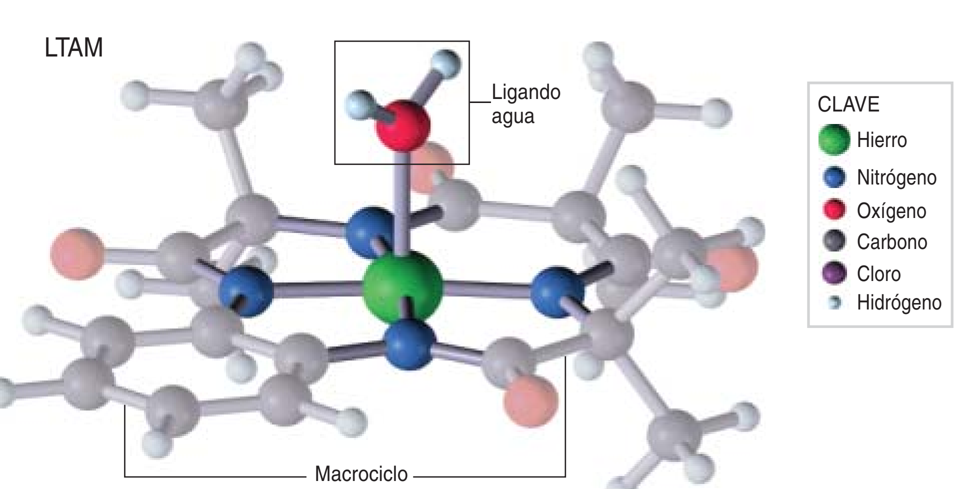
Tras quince años de investigación obtuvimos, por fin, el primer LTAM funcional. La noticia llegó una mañana en que Colin Horwitz, profesor de nuestro instituto, hizo alarde del resultado de un experimento de blanqueamiento en el que intervenía el que por entonces constituía nuestro diseño más avanzado. Cada vez que Horwitz lanzaba un chorro de colorante oscuro a una disolución que contenía el catalizador LTAM y peróxido de hidrógeno, la disolución se tornaba incolora rápidamente. Ello demostraba que los cortafuegos aguantaban lo suficiente para que los LTAM hiciesen su trabajo. Las moléculas estaban operando como enzimas, a pesar de su tamaño reducido: el peso molecular de un LTAM ronda los 500 dalton (un dalton equivale a una doceava parte de la masa del carbono 12, el isótopo más abundante del carbono), mientras que el de la peroxidasa de rábano picante, una enzima relativamente pequeña, es de unos 40.000 dalton. Los diminutos activadores LTAM son más fáciles y baratos de fabricar; además, ofrecen una reactividad más versátil que sus homólogos naturales.

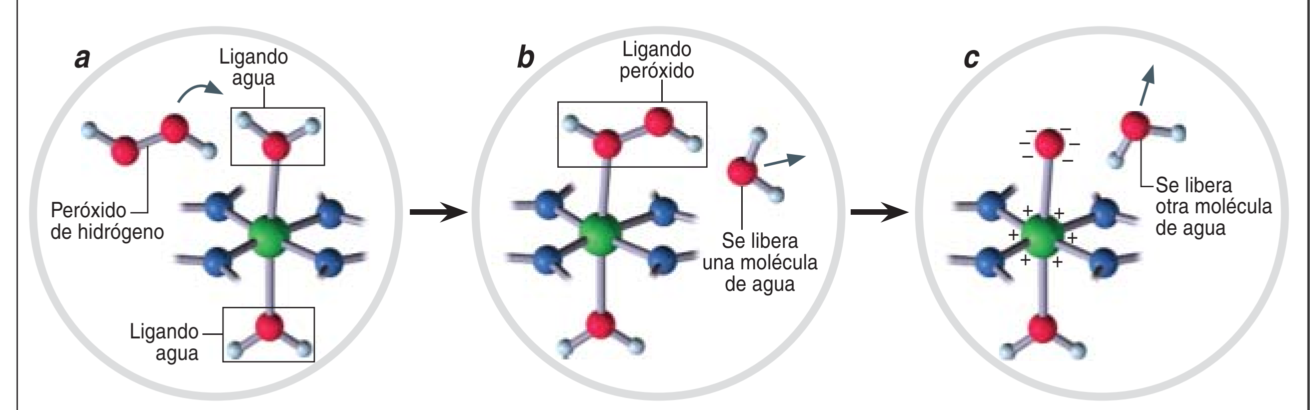
Desde entonces, hemos desarrollado más de 20 activadores LTAM mediante el mismo proceso de diseño en cuatro etapas que nos permitió obtener el primer modelo funcional. Cada LTAM tiene su propia velocidad de reacción y vida media; ello permite adaptar los catalizadores a las tareas que queremos que lleven a cabo. En su mayoría, los catalizadores incorporan elementos como el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y hierro, todos escogidos por su baja toxicidad. A algunas de las moléculas las denominamos "LTAM cazadores" porque están diseñadas para localizar y pegarse a determinados contaminantes o patógenos, de forma parecida a la que una mina magnética localiza el casco metálico de un barco. Otros LTAM operan como sopletes: "queman" la mayoría de las sustancias oxidables con las que entran en contacto. Otros son menos agresivos y más selectivos: atacan sólo a ciertas partes de la molécula o, de entre un grupo de moléculas, sólo a las más fáciles de oxidar. Esperamos adaptar los LTAM para que la química verde siga avanzando durante los próximos decenios. Aunque es preciso realizar más pruebas de toxicidad, a día de hoy los resultados indican que los LTAM descomponen los contaminantes en fragmentos no tóxicos, sin dejar rastros detectables de contaminación. En la actualidad, contamos con más de 90 patentes internacionales sobre activa-

UNA LAVADORA MOLECULAR

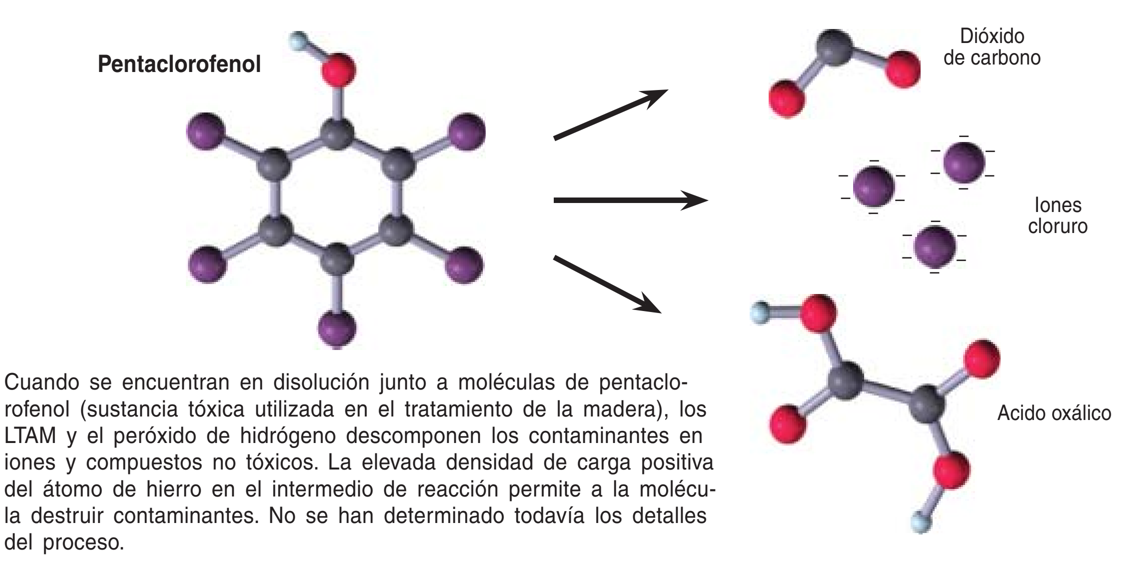
Los LTAM remedan las enzimas naturales que catalizan las reacciones en las que interviene el peróxido de hidrógeno. Pero los LTAM son cientos de veces más pequeños que las enzimas; ello simplifica y abarata su fabricación.

En el centro de cada LTAM hay un átomo de hierro unido a cuatro átomos de nitrógeno. En los bordes se disponen anillos de carbono que se unen entre sí para formar un anillo externo de mayor tamaño. Este macrociclo opera a la manera de un cortafuegos, que protege a la molécula de las reacciones violentas que desencadena. En estado sólido, el LTAM cuenta también con una molécula de agua (H_2O) unida al hierro. (Los grupos unidos al átomo central se denominan ligandos.)





Cuando un LTAM se disuelve en agua, se le une otra molécula de H_2O (*a*). El enlace que une las moléculas de agua al metal es débil: si en la disolución hay también peróxido de hidrógeno (H_2O_2), una molécula de este compuesto sustituye fácilmente a una de las aguas (*b*). Acto seguido, el ligando peróxido se desprende de sus dos átomos de hidrógeno y de un átomo de oxígeno en forma de una molécula de agua, dejando un átomo de oxígeno unido al hierro (*c*). El oxígeno atrae aún más los electrones que participan en el enlace, alejándolos del átomo de hierro; el LTAM se convierte así en un intermedio de reacción.



Cuando se encuentran en disolución junto a moléculas de pentaclorofenol (sustancia tóxica utilizada en el tratamiento de la madera), los LTAM y el peróxido de hidrógeno descomponen los contaminantes en iones y compuestos no tóxicos. La elevada densidad de carga positiva del átomo de hierro en el intermedio de reacción permite a la molécula destruir contaminantes. No se han determinado todavía los detalles del proceso.

MELISSA THOMAS; FUENTE: ARANI CHANDA *Instituto de Química de la Oxidación Verde*

LA QUIMICA, CADA VEZ MAS VERDE

La obtención de los catalizadores LTAM constituye sólo uno de los numerosos logros de la química verde, que se esfuerza por desarrollar productos y procesos que reduzcan o eliminen el uso y la generación de sustancias peligrosas. A continuación se enumeran otros avances:

PROYECTO	PARTICIPANTES	ESTADO
Utilización de azúcares de plantas para crear ácidos polilácticos (APL), una familia de polímeros biodegradables que sustituirían a un gran número de plásticos tradicionales derivados del petróleo	Patrick Gruber, Randy L. Howard, Jeffrey J. Kolstad, Chris M. Ryan y Richard C. Bopp, de NatureWorks LLC (filial de Cargill)	Nature Works ha construido una planta en Nebraska para la manufacturación de granulados de PLA, que se utilizan en la fabricación de botellas de agua, materiales de embalaje y otros productos
Descubrimiento de reacciones de síntesis que permiten utilizar agua en lugar de numerosos disolventes orgánicos comunes, algunos de los cuales provocan cáncer	Chao-Jun Li, de la Universidad McGill	Las compañías farmacéuticas y de materias primas químicas están investigando el proceso
Desarrollo de metátesis, un método de síntesis orgánica que permite fabricar, con mayor eficacia y menos residuos, fármacos, plásticos y otros productos químicos	Robert H. Grubbs, del Instituto de Tecnología de California; Richard R. Schrock, del Instituto de Tecnología de Massachusetts; Yves Chauvin, del Instituto francés del Petróleo	Este trabajo, de vasta aplicación en la industria química, biotécnica y alimentaria, recibió en 2005 el premio Nobel de química
Sustitución de disolventes tóxicos derivados del petróleo por dióxido de carbono supercrítico, un fluido que a temperatura y presión elevadas muestra, a la vez, las propiedades de un líquido y de un gas	Martyn Poliakoff, Michael George y Steve Howdle, de la Universidad de Nottingham	Thomas Swan & Co., un fabricante británico de sustancias químicas especializadas, ha construido una planta que utiliza fluidos supercríticos
Desarrollo de un método de producción de sertralina, el ingrediente principal del antidepresivo Zoloft	James Spavins, Geraldine Taber, Juan Colberg y David Pfisterer, de Pfizer	El método ha reducido la contaminación, el consumo de energía y el consumo de agua, al tiempo que ha mejorado la seguridad de los trabajadores y el rendimiento del proceso

FUENTE: TERRENCE J. COLLINS *Instituto de Química de la Oxidación Verde* Y PAUL ANASTAS *Instituto de Química Verde*; NATUREWORKS (*botellas*); AP PHOTO (*medalla*)

dores LTAM —y otras en camino— y varias licencias comerciales.

No conocemos todavía todos los detalles sobre la actividad de los LTAM. Sin embargo, la investigación comienza a arrojar luz sobre las reacciones fundamentales de estas moléculas. En estado sólido, los Fe-LTAM cuentan con una molécula de agua unida, constituida en ligando, al átomo de hierro, orientada de forma perpendicular al plano que definen los cuatro nitrógenos; cuando se añade a una disolución, otra molécula de agua se une al extremo opuesto del átomo de hierro. El enlace que une estos ligandos hídricos al metal es débil: si en la disolución hay también peróxido de hidrógeno, una molécula de este compuesto sustituye fácilmente a uno de los ligandos hídricos. Acto seguido, el ligando peróxido se reorganiza: se desprende de sus dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (que se liberan en forma de una molécula de agua), dejando un átomo de oxígeno unido al átomo de hierro central del Fe-LTAM. El catalizador se convierte así en un intermedio de reacción (IR).

El oxígeno es más electronegativo que el hierro: ello significa que su núcleo atrae hacia sí a la mayor parte de los electrones que participan en el enlace, alejándolos del núcleo del átomo de hierro. Este efecto incrementa la carga positiva del átomo de hierro central, haciendo que el IR sea lo suficientemente reactivo como para extraer electrones de moléculas oxidables presentes en la disolución. No hemos determinado todavía el mecanismo a través del cual el IR rompe los enlaces de sus moléculas diana. Sabemos, sin embargo, que la fuerza de los LTAM puede ajustarse mediante el cambio de los átomos situados en la cabeza y en la cola de la molécula: la introducción de elementos muy electronegativos en esas posiciones aleja aún mayor cantidad de carga negativa del átomo hierro, aumentando así la agresividad del intermedio de reacción.

A escala industrial

Sintetizar LTAM en el laboratorio es un asunto y otro, muy distinto, fabricarlos a gran escala para su comercialización. Hasta la fecha, las pruebas de laboratorio y los ensayos de campo han resultado prometedores. Los estudios financiados por la estadounidense Fundación Nacional para la Ciencia demostraron que los Fe-LTAM junto con los peróxidos eliminarían la contaminación procedente de un ataque bioterrorista. Descubrimos que, cuando combinábamos un LTAM con un butil-hidroperóxido terciario (una variante del peróxido de hidrógeno en la que uno de los átomos de hidrógeno se ha sustituido por un átomo de carbono unido a tres grupos metilo —CH_3),

la disolución resultante desactivaría el 99,99999 por ciento de las esporas de *Bacillus atrophaeus*, una especie bacteriana muy parecida al carbunco, en 15 minutos. Otra de las aplicaciones potenciales de importancia consistiría en el desarrollo de un desinfectante barato, constituido por Fe-LTAM y peróxido de hidrógeno, que hiciera frente a los microorganismos acuáticos infecciosos que tantas muertes y enfermedades provocan en el mundo.

En tres ensayos de campo, evaluamos la acción paliativa de los LTAM frente a la contaminación que origina la industria papelera. Cada año, este sector produce más de 100 millones de toneladas métricas de pulpa blanqueada, que se transforma en papel blanco. Amén de generar dioxinas, clorofenoles y otros compuestos organoclorados nocivos, muchas fábricas de papel vierten aguas residuales de color café que tiñen los arroyos y ríos e impiden la penetración de la luz en el agua. La reducción lumínica interfiere con la fotosíntesis; ello, a su vez, afecta a los organismos que dependen de las plantas para alimentarse. La tinción de las aguas se debe a la presencia de grandes fragmentos de lignina coloreados (el polímero que conecta las fibras de celulosa en la madera). El blanqueo con dióxido de cloro separa la lignina de la celulosa. Bacterias y otros organismos digieren los fragmentos de lignina de menor tamaño en tanques de tratamiento; los fragmentos de mayor tamaño, en cambio, al no poder digerirse, acaban en ríos y lagos.

Hemos ensayado la efectividad de los Fe-LTAM en la decoloración de estos fragmentos en dos fábricas de papel estadounidenses y una neozelandesa. En Nueva Zelanda combinamos Fe-LTAM y peróxido con 50.000 litros de aguas residuales. En los EE.UU., inyectamos directamente los Fe-LTAM durante varios días en una torre de tratamiento de la pulpa y en una tubería de salida. En conjunto, los Fe-LTAM redujeron la coloración del agua hasta en un 78 por ciento y eliminaron el 29 por ciento de los compuestos organoclorados.

Otras aplicaciones de los LTAM ofrecen también perspectivas alentadoras. Eric Geiger, de Urethane Soy Systems, con sede en Volga (Dakota del Sur), ha descubierto que los Fe-LTAM desempeñan una excelente labor en el procesado del aceite de soja para la fabricación de polímeros con propiedades físicas semejantes a las de los poliuretanos actuales, si no mejores. Los LTAM pueden llegar a utilizarse en las lavadoras automáticas: en otra serie de ensayos, descubrimos que la adición de una minúscula cantidad de catalizador en determinados detergentes de uso doméstico evitaba tener que lavar por separado la ropa blanca y la de color. Los LTAM impiden que la ropa destiña: atacan a los colorantes una vez que se han desprendido de un tejido y antes de que se incorporen a otro. Estamos trabajando también en una nueva familia de LTAM que rompen los enlaces moleculares fuertes que permiten a los fármacos y productos químicos agrícolas llegar intactos al agua potable.

A pesar del éxito de estas investigaciones, quedan todavía cuestiones pendientes sobre los LTAM. Es necesario realizar más ensayos a escala industrial. Debemos asegurar que los LTAM no originan alguna forma de contaminación que todavía no hayamos observado. Con excesiva frecuencia, los efectos negativos de una técnica química no se han hecho patentes hasta decenios después del inicio de su comercialización. Haremos todo cuanto esté en nuestras manos para evitar que este tipo de sorpresas sucedan con los LTAM.

¿Qué decir de los costes? Aunque los LTAM prometen ser competitivos en la mayoría de las aplicaciones, las grandes empresas han invertido mucho dinero en los procesos químicos que utilizan en la actualidad. En general, el cambio de técnicas y sistemas exige inversiones notables. Sin embargo, la introducción de los LTAM no requiere grandes retoques. Y no sólo eso; los LTAM pueden, en última instancia, ahorrar dinero a las compañías, pues ofrecen un método rentable para ajustarse a la legislación ambiental, cada vez más estricta.

Los avances logrados hasta la fecha por la química verde representan sólo unos pocos pasos preliminares en el largo camino que deberemos recorrer para hacer frente a la multitud de desafíos ambientales del siglo XXI. La cuestión de fondo es: ¿Vamos a dedicarnos a los "cuidados intensivos" o a la "medicina preventiva"? En la actualidad, los químicos suelen dedicarse a la creación de compuestos que resuelven el problema específico para el cual han sido diseñados, sin preocuparse por el alcance de su impacto. De hecho, estamos llevando a cabo experimentos a escala global en nuestros ecosistemas y en nosotros mismos; si estos experimentos fracasan, las consecuencias pueden ser de auténtica catástrofe. Las nuevas técnicas de la química verde ofrecen una alternativa. La Revolución Industrial se ha desarrollado, en su mayor parte, sin diseño ni previsión. Quizás ahora seamos capaces de revertir esa tendencia y contribuir a la construcción de un mundo en el que podamos vivir.

Los autores

Terrence J. Collins y Chip Walter colaboran en la divulgación de la química verde. Collins ocupa la cátedra Thomas Lord de Química en la Universidad Carnegie Mellon, donde dirige el Instituto de Química de la Oxidación Verde. Es también profesor honorario de la Universidad de Auckland, en Nueva Zelanda. Walter es periodista científico. Imparte clases de redacción científica en la Universidad Carnegie Mellon y es vicepresidente de comunicaciones en el hospital de la Universidad de Pittsburgh.

Bibliografía complementaria

TOWARD SUSTAINABLE CHEMISTRY. Terrence J. Collins en *Science*, vol. 291, n.º 5501, págs. 48-49; 5 de enero, 2001.

RAPID TOTAL DESTRUCTION OF CHLOROPHENOLS BY ACTIVATED HYDROGEN PEROXIDE. Sayam Sen Gupta, Matthew Stadler, Christopher A. Noser, Anindya Ghosh, Bradley Steinhoff, Dieter Lenoir, Colin P. Horwitz, Karl-Werner Schramm y Terrence J. Collins en *Science*, vol. 296, págs. 326-328; 12 de abril, 2002.

Toma ultrarrápida de imágenes de ondas de choque, explosiones y disparos

Nuevas técnicas de vídeo digital, combinadas con técnicas clásicas de toma de imágenes, ofrecen visiones inéditas de las ondas de choque

Gary S. Settles

Aunque hace más de un siglo que se conoce el fenómeno de las ondas de choque, aún no se sabe todo sobre ellas. Responden del fragor del trueno, del estampido de las armas de fuego, del estruendo de los fuegos artificiales o de la onda expansiva de una explosión química o nuclear. Pero son algo más que ruidos fuertes. Las ondas acústicas pueden considerarse parientes pobres de las ondas de choque en el aire: ambas son ondas de presión, aunque no una misma cosa.

Las ondas de choque tienen gran importancia en la física e ingeniería modernas, las operaciones militares, el procesado de materiales y la medicina. Su estudio nos ha enseñado mucho acerca de las propiedades de los gases y de las reacciones de los materiales cuando reciben inyecciones bruscas de energía; ha contribuido también al desarrollo de los láseres de gas y al estudio de la dinámica de plasmas.

Los recientes ataques terroristas con artefactos explosivos improvisados han realzado la importancia de investigar a fondo las explosiones y sus ondas de choque. El estudio de estas ondas, que tan destructoras pueden ser, nos facilita la cuantificación de las explosiones que las originan y permite mejorar la resistencia de edificios y aviones ante su embestida.

Las ondas de choque son tan transparentes —ahí no hay diferencia con las acústicas— como el aire que surcan. De ordinario, sólo cabe verlas claramente con la ayuda de instrumentos especiales bajo condiciones de laboratorio controladas. Nuestro grupo de investigación ha combinado, sin embargo, un moderno equipo de videografía ultrarrápida con algunos métodos clásicos de visualización para captar, en condiciones más realistas, imágenes de las ondas de choque producidas en explosiones y disparos. Percibimos así el desarrollo y la propagación de esos frentes de onda a una escala en la que antes no había sido posible grabarlas.

Optica del mundo transparente

Los propios fenómenos transparentes dejan a veces señales delatoras. Las ondas de choque, la condensación de humedad, las alteraciones del polvo, las cabrillas en el agua, las deformaciones ópticas y las sombras delatan las ondas de choque. Ciertos depredadores acuáticos localizan a sus presas transparentes por las sombras que el Sol les proyecta sobre el lecho marino.

Robert Hooke descubrió este efecto hace más de tres siglos al observar la sombra de una vela que ardía mientras la iluminaba el Sol. Encima de la llama encontró un penacho de aire caliente que, aunque no era visible directamente, arrojaba una sombra, ya que los cambios de densidad del aire refractaban los rayos luminosos. Al método de Hooke se le llama ahora umbragráfico; se trata de un enfoque muy sencillo que da muy buenos resultados a la hora de visualizar ondas de choque.

Hooke describió también otra característica visible de los fenómenos transparentes: deforman un patrón de fondo que se contemple a su través, del mismo modo que un paño de vidrio de ventana antiguo alabea la imagen del mundo que hay afuera. Hooke se adelantaba a su tiempo; su modo de observar fenómenos transparentes quedó sin aplicación hasta que el científico alemán August Toepler lo redescubrió mediado el siglo XIX y observó con él las chispas eléctricas. Vio así en el aire ondas esféri-



1. LA FOTOGRAFIA ULTRARRAPIDA permite captar el instante de la descarga de un rifle del calibre .30-06 (7.62 milímetros). La exposición rápida toma al proyectil cuando sale del cañón a unos 2,5 mach, pero normalmente no son visibles la onda de choque esférica de boca y las ondas de choque oblicuas que siguen al proyectil. Aunque esta imagen se registró en película, nuevas técnicas de vídeo digital, que llegan a grabar la deformación que las ondas producen en un patrón de fondo, han facilitado la entrada en la era moderna de algunos procedimientos ópticos clásicos, que ahora pueden retratar con alta resolución detalles balísticos en un campo visual amplio y bajo condiciones realistas. Como en dinámica de fluidos se conviene en representar los flujos de izquierda a derecha, en este artículo algunas figuras se han impreso al revés.

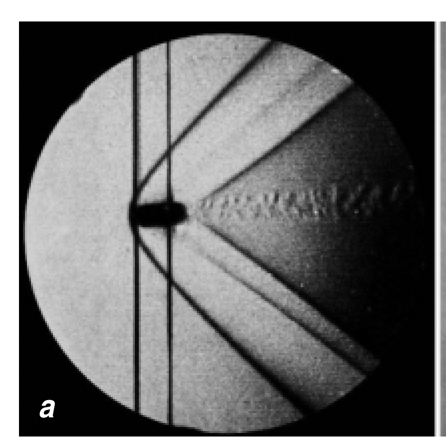
GARY S. SETTLES/*American Scientist*

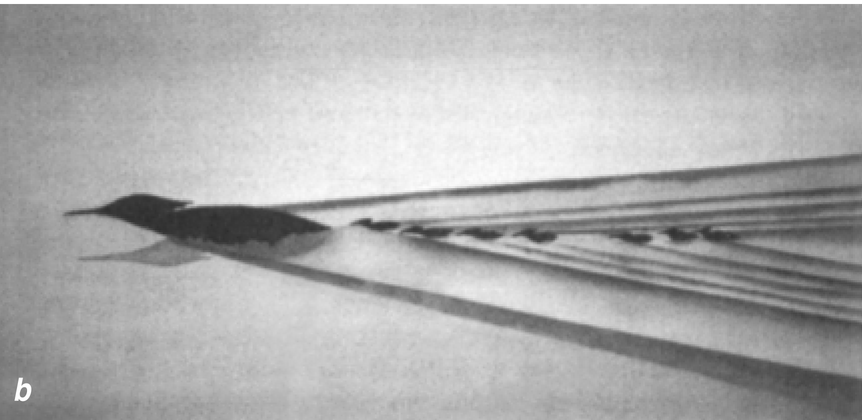
cas generadas por fuertes descargas eléctricas. Creyó que observaba el sonido; en realidad, fue el primero en ver ondas de choque. Toepler llamó a su procedimiento óptico "método *Schlieren*". "Schlieren" significa en alemán "estrías", de ahí el nombre español de "estrioscopia". Aunque las técnicas empleadas han cambiado mucho, sobre todo cuando hay que captar grandes campos visuales, el nombre persiste hoy día.

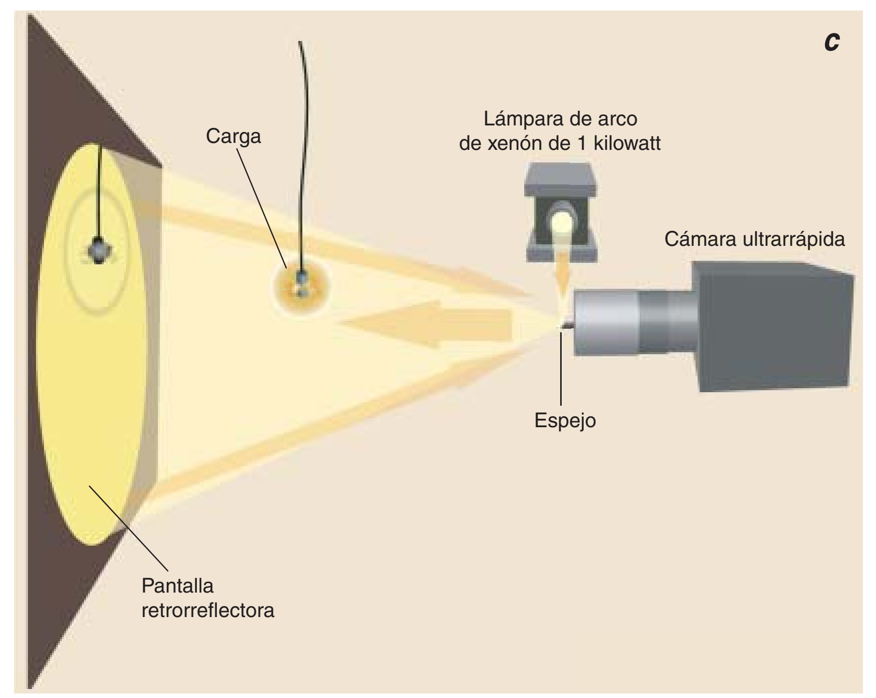
En el decenio de 1880, Ernst Mach y sus colaboradores emplearon el método estrioscópico para observar disparos de armas de fuego y zanjar así la discusión acerca de qué ocurría cuando una bala viajaba más deprisa que el sonido. Vieron que las ondas de choque seguían a las balas supersónicas como la ola de la estela de una lancha rápida. Esas observaciones serían esenciales en el nuevo campo de la balística. El nombre de Mach quedó vinculado al cociente adimensional de la velocidad V de un objeto y la velocidad del sonido: el número de Mach.

Mach tenía por lema "ver es entender". El, Hooke, Toepler y otros investigadores más recientes comprendieron un principio que une los mundos de la técnica y del arte: a fin de entender un fenómeno nuevo o complicado, apenas haya empezado la investigación, se necesita una imagen física. Es cierto en especial para los patrones de flujo de gases y líquidos, que suelen ser transparentes. Sin al menos un cuadro conceptual, trabajar con fluidos es como trabajar con objetos sólidos en la oscuridad. Para conseguir ese cuadro, sea por experimentación o por simulación informática, se recurre a una rama especial de la dinámica de fluidos, la *visualización de flujos*. Las técnicas estrioscópica y umbrascópica con que se toman imágenes de las ondas de choque son instrumentos esenciales para la visualización de flujos cuyo índice de refracción difiera del índice del aire circundante y, por tanto, desvíen la luz.

Como esas herramientas y el estudio de la balística cuentan con más de un siglo de edad, quizá cueste imaginar qué podría renovar el interés en ellas. No se trata sólo de la presente necesidad de medidas contraterroristas; están además las modernas cámaras electrónicas ultrarrápidas que captan procesos explosivos transitorios y ondas de choque en movimiento rápido. Algunos lamentamos que la era de la película fotográfica haya llegado casi a su fin. No obstante, con su desaparición, los métodos de la cinematografía ultrarrápida, bastante engorrosos, están siendo sustituidos por la videografía ultrarrápida, cuya cadencia de toma de imágenes y resolución y su magnífica facilidad de uso mejoran de día en día, así como la pequeñez y robustez de los aparatos. Gracias a estos avances, los métodos ópticos más sencillos, como la umbragrafía, salen del laboratorio al aire libre, donde ahora es posible practicar la toma ultrarrápida de imágenes de ondas de choque a una escala sin precedentes. Junto con las ventajas que proporcionan las cargas explosivas reducidas (del orden de los gramos) que se emplean por razones de seguridad y comodidad en las investigaciones, esta técnica abre nuevas perspectivas en el estudio de ondas de choque y explosiones.







2. LA PRIMERA FOTOGRAFIA de ondas de choque oblicuas de una bala supersónica fue tomada por Ernst Mach y Peter Salcher en el decenio de 1880 (*a*). La semejanza entre ondas de choque y las ondas en la superficie del agua —producidas aquí por una familia de patos al huir de un intruso (*b*)— no es casual. Para ambas configuraciones de corriente rigen las mismas ecuaciones en derivadas parciales. Está generalmente admitido que este tipo de ondas indican una velocidad muy alta. Pueden obtenerse imágenes de esta forma de ondas de choque con un montaje umbrascópico retrorreflector. Creó este sistema Harold E. "Doc" Edgerton, famoso por su invento de la lámpara electrónica de destello y sus fotografías ultrarrápidas. El grupo del autor modificó el haz de la lámpara de arco enfocándolo en un pequeño espejo inclinado 45 grados, fijo en el extremo de una varilla centrada en el objetivo de la cámara, para evitar la doble imagen que se produce cuando la lámpara y la cámara no estén en el mismo eje (*c*). El espejo produce un punto luminoso en la pantalla retrorreflectora, que devuelve a la cámara una luz muy intensificada. Las perturbaciones en el recorrido del haz luminoso —aquí, una pequeña carga explosiva— proyectan sombras sobre la pantalla, que la videocámara capta.

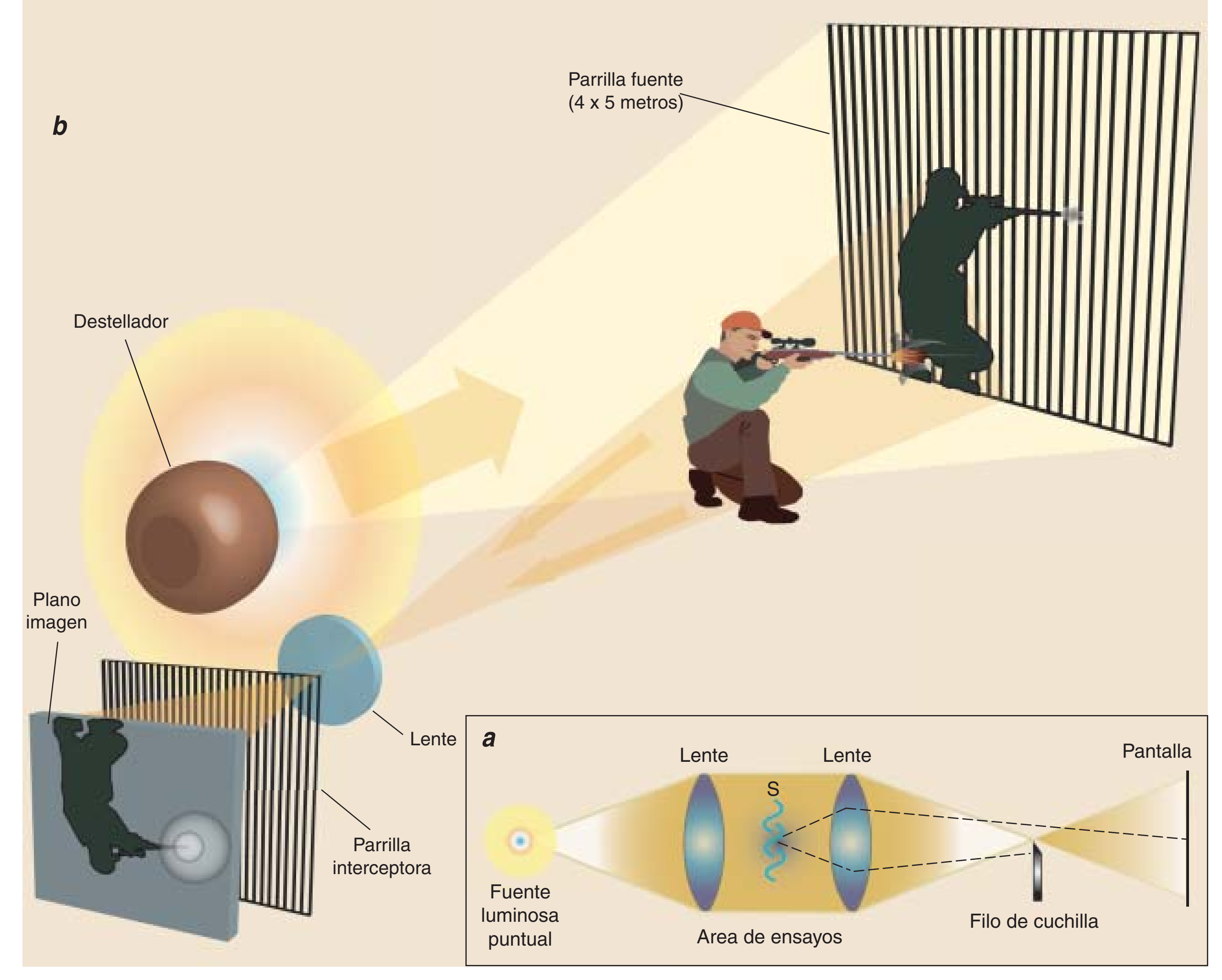
CORTESIA DE PETER KREHL, *Instituto Ernst Mach* (*a*); *"Huida"*, ACUARELA DE CONNIE BARLOW, 1980 (*b*); RUSSELL HOUSE (*c*)/*American Scientist*

La contribución de mi laboratorio, el Laboratorio de Dinámica de Gases del estado de Pennsylvania, ha consistido sobre todo en liberar del banco de trabajo a los métodos estrioscópico y umbragráfico. Los hemos aplicado a campos visuales extensos sin necesidad de espejos telescópicos parabólicos de tamaño excesivo; hasta los hemos sacado al aire libre. Les hemos dado usos que redundan en la seguridad de las personas. Así, los hemos utilizado para robustecer aviones; no se había hecho antes, aunque a todas luces era necesario. Actualmente, nos dedicamos a la extensa gama de estudios científicos que pueden efectuarse, sin peligro y económicamente, con cargas explosivas de sólo unos gramos y a la medición óptica cuantitativa del movimiento de las ondas de choque por medio de la moderna videografía ultrarrápida. Los datos experimentales que obtenemos no sólo resultan útiles para dilucidar la física de las explosiones, la fragmentación y los daños que causan las ondas expansivas, sino también para servir de pauta a las simulaciones computadorizadas de esos eventos y validarlas.

Ondas de choque

Pero antes consideremos qué es y qué no es una onda de choque. Bart Simpson envía una onda de choque que sacude Springfield entero cuando grita por unos megáfonos puestos en fila. Un niño que hiciera lo mismo se llevaría una desilusión: descubriría que de esa manera no se generan ondas de choque. Está claro que Hollywood no sabe de ondas de choque: la moto del héroe puede correr más que la onda expansiva de una explosión. Las motos reales no pueden ni acercarse a tales velocidades, y si lo hicieran, posiblemente perderían contacto con el suelo.

Una onda de choque carece de sustancia propia; es un frente de onda sutilísimo que, impulsado por colisiones moleculares a escala nanométrica, atraviesa, como un tsunami, sólidos, líquidos y gases a muy alta velocidad. Se trata de una onda de



3. EL ESTRIOSCOPIO DE AUGUST TOEPLER usaba dos lentes y una lámpara pequeña pero muy potente, con destellos de microsegundos, para proyectar una imagen sobre una pantalla (*a*). En la pantalla aparecían las siluetas de los objetos opacos situados entre las lentes. Un fenómeno transparente, por ejemplo una onda de choque (*S*), que tenga lugar en el área de ensayos apartará los rayos de su trayecto original. Se representan dos de esos rayos, uno desviado hacia arriba, el otro hacia abajo (*líneas discontinuas*). El rayo desviado hacia arriba ilumina un punto de la pantalla, pero al desviado hacia abajo lo intercepta un "filo de cuchilla" situado en el foco de la segunda lente. Su punto imagen correspondiente se ve oscuro contra un fondo gris. El disparo de un arma de fuego entre las lentes refracta una multitud de rayos en multitud de direcciones, de manera que en la pantalla da una imagen de sí mismo. La toma de fotografías estrioscópicas de fenómenos a mayor escala se basa en un principio diferente. El Sistema Estrioscópico a Escala Natural del Estado de Pennsylvania emplea, en vez de lentes, una parrilla retrorreflectora como fondo (*b*). Un objetivo fotográfico enfoca esa parrilla fuente sobre la parrilla interceptora —un negativo fotográfico de la parrilla fuente—, bloqueando así la luz procedente del plano imagen. Sin embargo, las distorsiones ópticas en el área de ensayos permiten el paso de alguna luz; se forma así la imagen estrioscópica. Cada franja clara de la parrilla fuente y cada franja oscura correspondiente de la parrilla interceptora constituyen un sistema estrioscópico de Toepler.

RUSSELL HOUSE/*American Scientist*

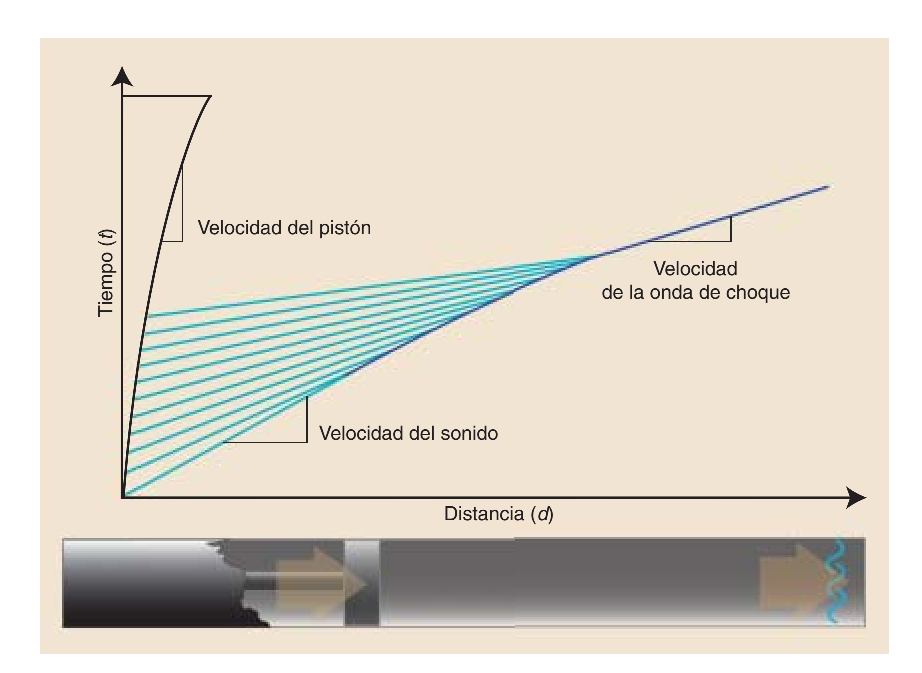
compresión —un pico de presión repentino seguido de una súbita caída de presión— que se forma, por ejemplo, cuando la velocidad de un objeto (una bala, digamos) se mueve a mayor velocidad que la del sonido en el medio circundante (el aire, en tantos casos).

En el aire, las ondas acústicas, procedan de un susurro o de un grito, viajan a una misma velocidad, la velocidad del sonido *a* (de *a*cústica), que, aunque depende de la temperatura del aire, viene a ser de unos 340 metros por segundo en circunstancias "ordinarias". Por otra parte, las ondas de choque viajan más rápido que *a*; son supersónicas. También su intensidad y energía superan las de las ondas acústicas. Se apartan mucho de la linealidad y causan saltos térmicos, de presión y de densidad de gran magnitud en el aire que haya sobre su espesor ondulatorio de sólo unos nanómetros. El gran cambio instantáneo de presión al paso por el cuerpo humano de una onda de choque intensa causa graves lesiones.

En una conversación normal, con una intensidad acústica entre 60 y 70 decibelios (dB), las fluctuaciones de la presión del aire no llegan ni a una millonésima de atmósfera. Los "ruidos" dolorosamente altos, como los de un motor de reacción, de unos 110 dB, son en realidad ondas de choque muy débiles. Se las puede ver con los métodos que aquí se descri-



4. UN CAZA F-18 BLUE ANGEL de la Armada de EE.UU. en vuelo transónico sobre la bahía de San Francisco deja tras sí signos de las ondas de choque. Estas comprimen el aire que rodea al aparato; el aire se expande enseguida y se produce una condensación visible de la humedad. La estela blanquecina sobre el agua se debe al fuerte "viento" que las ondas de choque inducen detrás de sí.



5. EL MOVIMIENTO RAPIDO DE UN PISTON dentro de un tubo puede producir una onda de choque. El movimiento acelerado del pistón estará representado, en una gráfica que muestre su posición en el tubo en cada instante, por una curva que finalmente indicará una velocidad de avance constante. (La velocidad es la pendiente de esa curva.) El movimiento inicial del pistón envía tubo adelante una perturbación de presión, u onda sónica, que se propaga a la velocidad que inicialmente le corresponde al sonido en el aire que llena el tubo. Esa velocidad acústica es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura del gas, pero con cada onda sónica el gas se va calentando. Por tanto, conforme se acelera el pistón, a la primera onda sónica le seguirán muchas, cada una a una velocidad acústica cada vez mayor. (Por claridad, sólo se ilustran unas cuantas.) Al alcanzarse unas a otras y reforzarse entre sí dan lugar a una perturbación muy fuerte, una onda de choque, que viaja a una velocidad mayor que la velocidad acústica en el gas no perturbado: se trata de un fenómeno supersónico. En el laboratorio, en vez de un pistón se emplea un diafragma delgado que encierra gas a presión. Cuando se rompe el diafragma, el gas a presión se expande como si fuera un pistón en movimiento, creando una onda de choque. Este dispositivo se llama *tubo de ondas de choque*.

CORTESIA DE PETER STEEHOUWER (*arriba*); RUSSELL HOUSE (*abajo*)/*American Scientist*

ben, pero viajan apenas un poco más deprisa que las ondas acústicas, con unos picos de presión de sólo unas cienmilésimas de atmósfera. En cambio, una onda de choque fuerte, que viaje a 2 mach, produce un pico de sobrepresión de 4,5 atmósferas, más que suficiente para destruir el delicado aparato auditivo humano y provocar otros estragos biológicos. Sin embargo, estos efectos pueden controlarse con propósitos médicos. En la *litotripsia por onda de choque* se enfoca la energía de una onda de choque en un punto del interior del cuerpo para romper las piedras renales; apenas daña los tejidos contiguos.

Las ondas de choque esféricas causadas por explosiones decrecen velozmente de intensidad a medida que se alejan del foco; enseguida se estabilizan a 1,0 mach, la velocidad del sonido. Esa tasa de disminución de la velocidad puede deducirse de un vídeo umbragráfico ultrarrápido. Como expusieron en 2003 Harald Klein, de la Academia Militar Australiana, y sus colaboradores, con la curva obtenida representando gráficamente los datos de decrecimiento de la velocidad se halla la masa equivalente de un explosivo, comparada con el estándar de trinitrotolueno (TNT).

Cerca de la explosión, la onda de choque se propaga a una velocidad varias veces la del sonido y alcanza presiones de diez o más atmósferas; los efectos son devastadores. Además, el "viento" que sigue inmediatamente a una onda de choque intensa es breve, pero muy fuerte. En una explosión, la bola de fuego se dilata muy deprisa y empuja el aire hacia delante. Conforme la onda de choque avanza desde el foco de la explosión, la velocidad del viento que la sigue es igual a la de la bola de fuego inicial. El viento que sigue a una onda de choque de sólo 1,3 mach es más fuerte que los más veloces que un tornado haya generado. En las filmaciones de las pruebas nucleares en superficie anteriores a 1963, se ve que la onda de choque revienta edificios cuyos escombros son luego barridos por el viento que viene a continuación.

Explosiones

¿Qué genera unas ondas de choque tan intensas? Dado que un sistema estéreo genera ondas acústicas, ¿po-

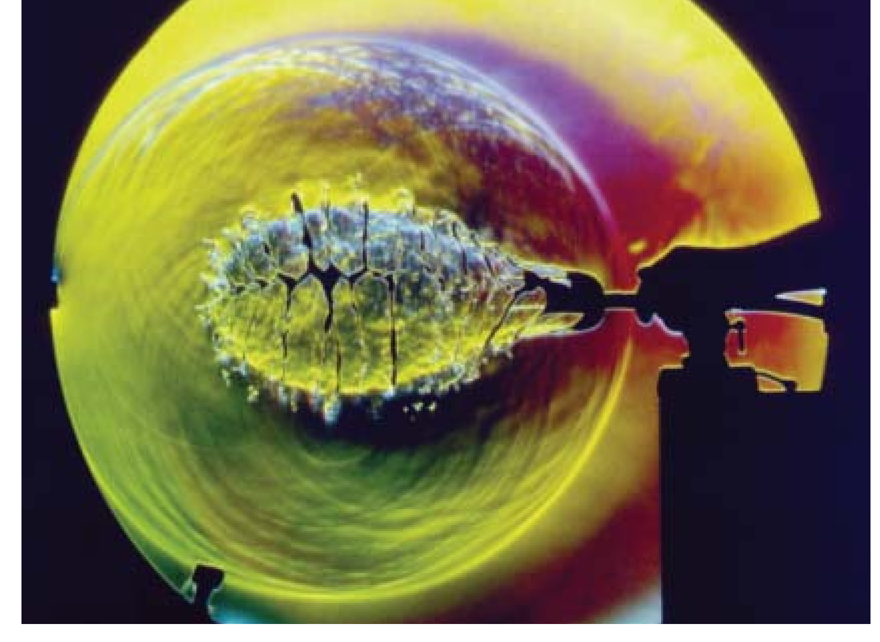
demos poner al máximo el volumen para generar ondas de choque? No: los altavoces sólo están diseñados para que sus vibraciones reproduzcan sonidos. Las ondas de choque se generan mediante un "empuje" rápido y continuo, o mediante un objeto que se mueva a una velocidad supersónica. El restallido de un látigo crea ondas de choque, aunque sean débiles, porque su extremo se mueve a una velocidad mayor que la del sonido.

Pero el mejor procedimiento para generar una onda de choque intensa en el aire es liberar una gran cantidad de energía confinada en un espacio reducido. El gas presurizado es un ejemplo. Al liberarse, se expande muy rápidamente y evacua la atmósfera por donde pasa, con lo que se forma una onda de choque. Incluso el reventón de un globo basta para generar una débil onda de choque. En el laboratorio, lo mejor para estudiar ondas de choque es un "tubo de ondas de choque", donde las ondas se producen al romperse un diafragma delgado que separa gases a alta y a baja presión.

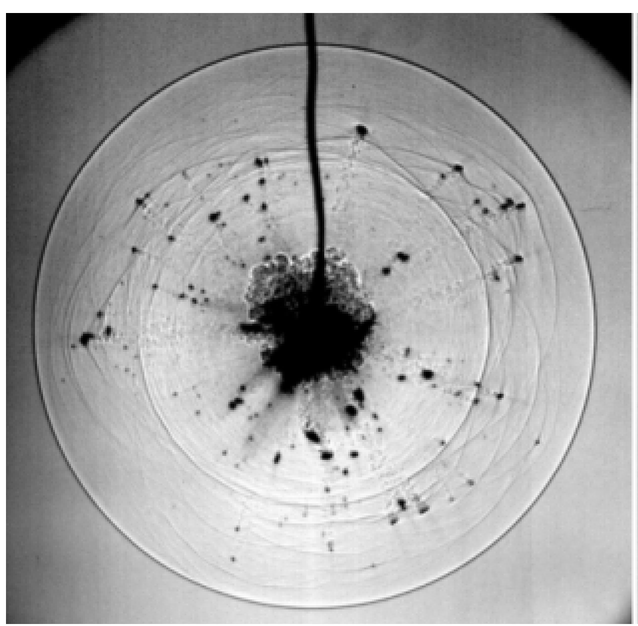
Los explosivos sirven también para producir ondas de choque. En este caso, la energía está contenida en una forma química inestable —nitratos, a menudo— y puede liberarse en un microsegundo. La mayoría de los compuestos explosivos contienen menos energía por unidad de masa que la mantequilla de mesa ordinaria, pero por suerte ésta es estable y no estalla.

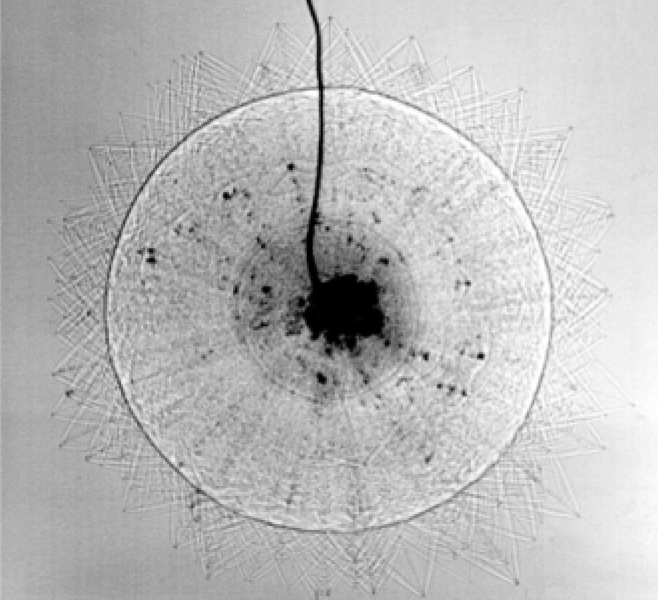
La pérdida de vidas causada por una explosión suele deberse más a la fragmentación que a la sobrepresión o al viento que sigue a la onda de choque en sí. La metralla se comporta como una lluvia de balas supersónicas, aceleradas en todas las direcciones radiales desde el foco de la explosión por la fuerza de arrastre aerodinámico ejercida por el gas en expansión rápida.

Las ondas de choque intensas son también devastadoras para las



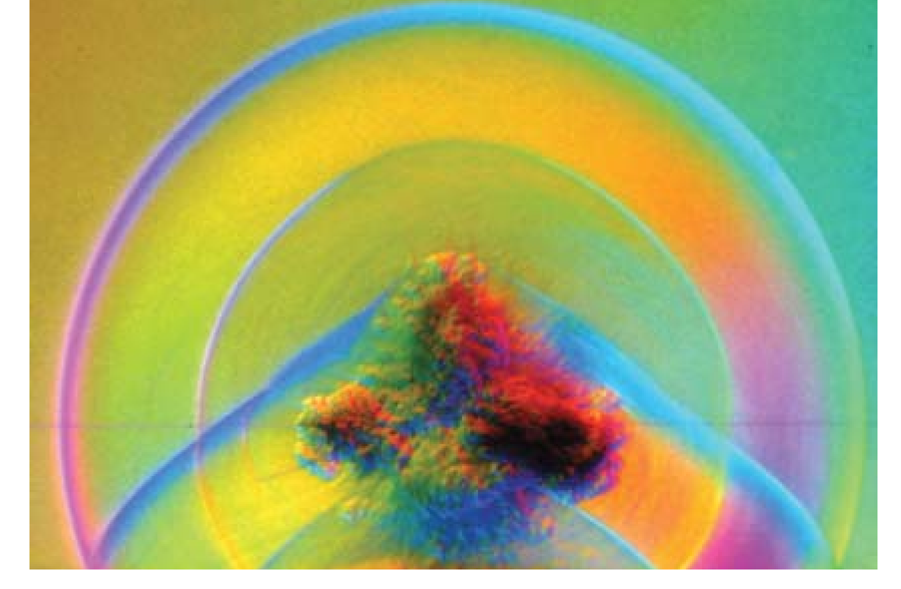
6. LA FOTOGRAFIA ESTRIOSCOPICA del reventón de un globo infantil muestra que el material se trocea rápidamente y deja ver en el interior una burbuja globular de aire comprimido. Pese a que la forma inicial del globo no es esférica, la onda de choque sí lo es. Los colores de esta imagen se deben a un filtro de color que sustituye al filo de cuchilla.





7. LOS UMBRAGRAMAS de dos pequeñas cargas explosivas muestran los peligros de la fragmentación. Se utilizaron cargas explosivas de 1 gramo de triperóxido de triacetona (TPTA) encapsulada. Su ignición eléctrica produjo unas ondas de choque esféricas que se registraron mediante exposiciones de 1 microsegundo cuando cada una tenía alrededor de un metro de diámetro. A la izquierda, la cápsula se fragmenta en grandes trozos que salen proyectados, tras la onda de choque, a una velocidad próxima a la del sonido. En la imagen de la derecha, los fragmentos son mucho más pequeños y viajan a velocidades supersónicas por delante de la onda de choque principal. En las explosiones a escala natural, esos fragmentos son tan mortíferos como una lluvia de balas.

GARY S. SETTLES/*American Scientist*



8. LA DETONACION DE UNA PEQUEÑA CARGA de 10 miligramos de nitrato de plata tres centímetros por encima de una superficie genera una onda de choque esférica primaria y otra secundaria que se reflejan irregularmente en el suelo. Aunque las ondas de choque de las explosiones al aire libre poseen simetría esférica, sus reflexiones en los objetos vuelven mucho más complejas sus configuraciones. Los colores apastelados están producidos por filtros de colores codificados de modo que indiquen la dirección en que se refracta la luz.

estructuras. En el atentado terrorista de 1995 contra el edificio federal Murrah de Oklahoma City, un camión bomba explotó a unos pocos metros del edificio. La consiguiente onda de choque y sus efectos asociados destruyeron los pilares de soporte de la fachada norte del edificio, que se derrumbó. El balance fue de 168 muertos y muchos más heridos. Ahora, tanto la experimentación como las simulaciones en ordenador de ondas expansivas aportan a los arquitectos información sobre cómo amortiguar esos efectos letales, evitar el colapso de los edificios y mejorar la supervivencia en caso de que ocurra.

Pero los experimentos pueden resultar a veces caros y peligrosos si se hacen a escala natural. La tendencia reciente se orienta hacia unas simulaciones más baratas, menos peligrosas y más rápidas de los efectos de las explosiones, con cargas explosivas de unos pocos gramos, modelos a escala y vídeos de las ondas de choque. Aplicando las leyes conocidas de la semejanza en diferentes escalas a pequeñas explosiones efectuadas en laboratorio, se simulan en maquetas los efectos de la fragmentación y las ondas de choque sobre edificios en proyecto o vehículos. Nuestras videocámaras ultrarrápidas graban la posición de la onda de choque en función del tiempo para cada estrioscopia o umbragrafía; con estos resultados determinamos todas las propiedades del fluido tras haber sufrido la onda de choque.

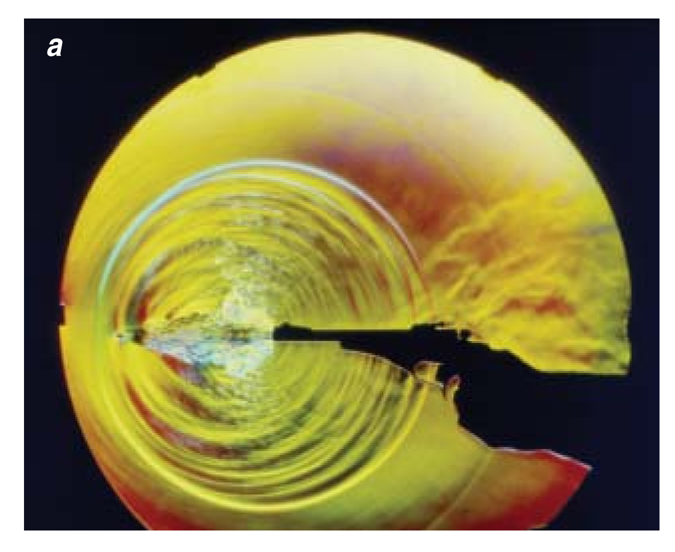
Incluso después de varios costosos experimentos a escala natural con aviones reales, sigue sabiéndose poco de la dinámica de los gases en las explosiones a bordo de aeronaves comerciales. Si se desea que alguna vez los aviones ganen en robustez frente a fallos en vuelo a causa de explosiones, sean accidentales o provocadas, tendremos que mejorar nuestros conocimientos. La reverberación de las ondas de choque en las superficies internas complica las explosiones dentro de los aviones y de los edificios. Los restos del vuelo 103 de Pan Am, derribado en 1988 por una bomba en Lockerbie (Esco-





9. LAS IMAGENES ESTRIOSCOPICAS de las reflexiones de las ondas de choque podrían ayudar a los proyectistas a mejorar la resistencia de los aviones a las explosiones. Se han tomado estriogramas de simulaciones, a una escala del 60 por ciento, de la bomba colocada en el compartimento de equipajes que destruyó el vuelo Pan Am 103 en 1988 (*izquierda*), y de una simulación a escala natural —con asientos de avión reales y maniquíes de sastrería— del intento en 1994 de Ramzi Yousef —quien antes había atentado contra las Torres Gemelas—, de derribar un vuelo de Aerolíneas Filipinas con una bomba de nitroglicerina situada bajo el asiento de un pasajero (*derecha*). En ambos casos, una pequeña detonación de gas acetileno/oxígeno produjo una bola de fuego y una onda de choque en el Sistema Estrioscópico a Escala Natural del estado de Pennsylvania.





10. LAS TECNICAS DE ESTRIOSCOPIA EN COLOR y de umbragrafía en blanco y negro, aunque recogen una información similar, resaltan detalles complementarios. Una fotografía estrioscópica en color con un microsegundo de exposición (*a*) aprehende un instante del disparo de una pistola de competición del calibre .22. La onda de choque en el aire y la bala transónica han abandonado la boca del cañón, seguidas de los gases propulsores. La onda expansiva de boca es el estampido que se oye cuando se dispara un arma. Hacia el lado derecho de la imagen se aprecia la convección térmica que sube desde el arma y la mano del tirador. Una toma ultrarrápida de vídeo umbragráfico (*b*) muestra el disparo de un solo cartucho de una metralleta AK-47, con su onda esférica de boca y la bala que arrastra consigo las ondas de choque oblicuas.

cia), dieron en un primer momento la impresión de que había habido múltiples explosiones simultáneas en varios puntos del fuselaje. Al avanzar la investigación, se vio que las ondas de choque habían recorrido el fuselaje a la largo y a lo ancho. En ocasiones se reflejaron; se produjeron por eso varios reventones lejos de la verdadera posición de la bomba, alojada en la bodega de carga delantera.

La toma óptica de imágenes de ondas de choque puede ayudar a explicar los complicados efectos de esas explosiones a bordo. La Administración de Seguridad en el Transporte de EE.UU. no sólo ha efectuado simulaciones; voló contenedores de carga llenos de equipaje con explosivos como los que podría colocar un terrorista. La videografía ultrarrápida captó las ondas de choque en un experimento de ese tipo. Se utilizó la umbragrafía retrorreflectora, ideada por Harold E. "Doc" Edgerton; el aparato aguantó un entorno extremo y las fuertes sacudidas.

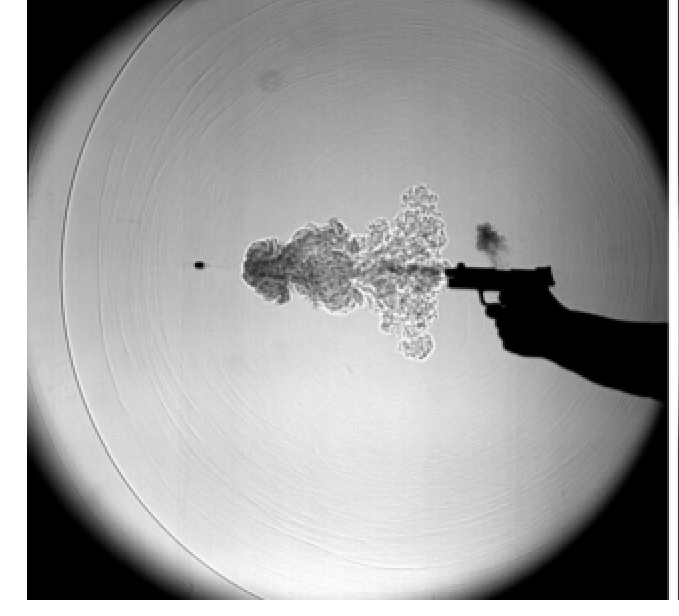
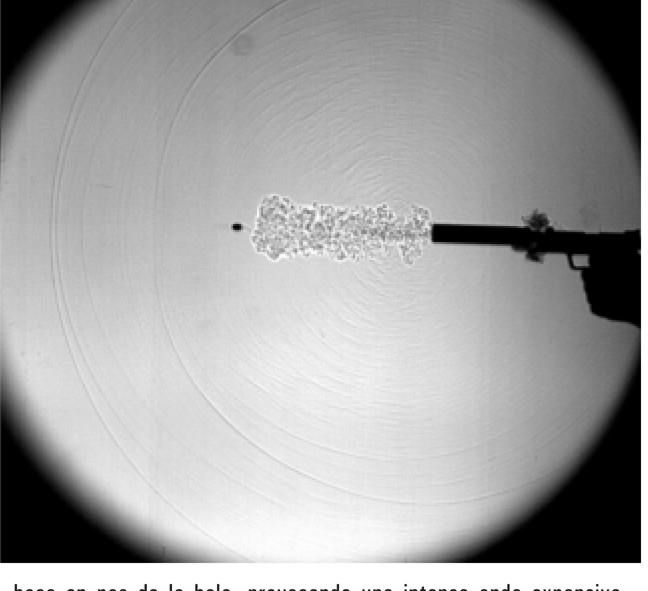
Las pantallas retrorreflectoras devuelven al objetivo una iluminación varios órdenes de magnitud mayor que la sencilla pantalla blanca difusa que suele emplearse en la umbragrafía. Funciona como un reflector esférico; devuelve gran parte de la luz que incide en ella a su punto de origen. En la umbragrafía por vídeo ultrarrápido, la pantalla retrorreflectora se necesita para crear una imagen brillante.

El método original de Edgerton tenía un fallo: había que separar un poco el eje de la cámara del eje de la fuente luminosa. Se creaba por ello una confusa doble imagen. Para corregirlo, podría emplearse un divisor de haz, pero con gran pérdida de intensidad de iluminación. Nosotros



11. ESTE ESTRIOGRAMA A ESCALA NATURAL muestra la descarga de un revólver Magnum del .44. Se ven dos ondas de choque esféricas, una centrada en la boca del arma (la onda de boca) y una segunda centrada en el cilindro. Junto al borde izquierdo se ve la bala supersónica. Esta arma produce un destello luminoso en la boca y una nube, de productos de la combustión de la pólvora, que envuelve las manos del tirador. Las imágenes ultrarrápidas ayudan a los expertos forenses a descubrir de qué modo se forman las huellas de pólvora que quedan en las manos cuando se dispara un arma.

EL AUTOR AGRADECE SU AYUDA A GARY Y CAROL KATONA (*arriba, a*); EL AUTOR AGRADECE SU AYUDA A E. M. FREEMESSER Y E. F. SPENCER, JR. (*arriba, b y abajo*)/*American Scientist*

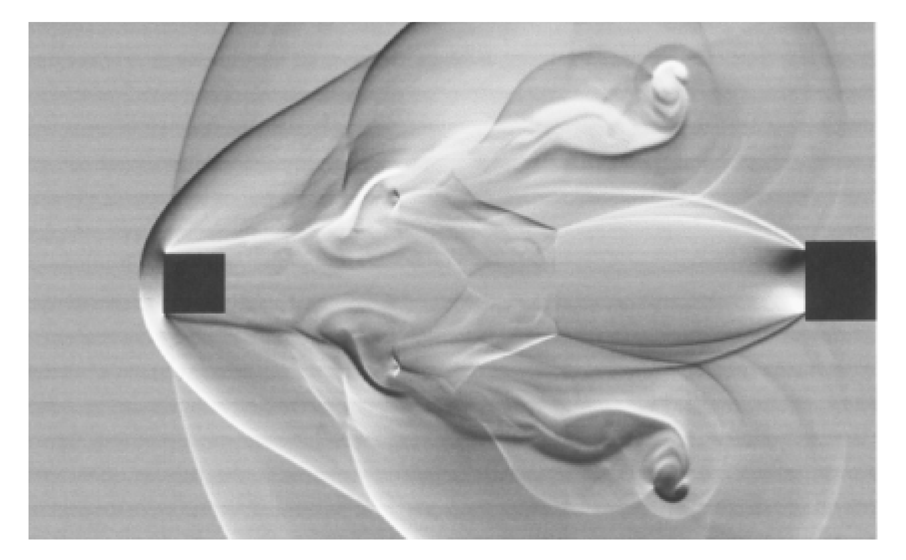
12. CON IMAGENES DE VIDEO ULTRARRAPIDAS se aclaran las diferencias entre el disparo de una pistola del .45 (*izquierda*) y el disparo de la misma arma equipada con silenciador. Sin éste, los gases de la pólvora se expanden lateralmente cuando salen por la boca en pos de la bala, provocando una intensa onda expansiva que se percibe como un fuerte estallido. Con el silenciador, se reduce la expansión lateral, se debilita la onda expansiva y se percibe un ruido de chorro, más un siseo que una detonación.

sujetamos un pequeño espejo girado 45 grados al eje de un filtro colocado sobre el objetivo de la cámara y reflejamos el haz en su superficie antes de enviarlo a la pantalla. Ese montaje produce una perfecta alineación entre los ejes de la fuente luminosa y de la cámara, sin que la pequeña área del objetivo ocluida por el espejo suponga una pérdida apreciable de calidad del umbragrama.

Disparos

Todo esto nos lleva inexorablemente al tema de las armas de fuego. Tras siglos de perfeccionamientos, lanzan sus proyectiles con enorme velocidad y precisión mortífera. Ernst Mach hablaba con sarcasmo de sus investigaciones sobre las balas supersónicas; esperaba que le reprochasen su falta de utilidad, ya que "no se puede hacer la guerra sólo con proyectiles fotografiados".

Por polémica que sea la cuestión, podemos aprender de las imágenes balísticas ultrarrápidas, y quizás aplicar esos conocimientos a salvar vidas y prevenir la delincuencia. Las investigaciones forenses de residuos de pólvora, heridas de bala a quemarropa, protección acústica de tiradores y localización de francotiradores pueden beneficiarse de la observación y el estudio de las ondas de choque y fenómenos afines.



13. ESTA SIMULACION POR ORDENADOR de una imagen estrioscópica se generó a partir de una resolución numérica de las ecuaciones de movimiento; imita la salida del cañón de una bala supersónica, modelada aquí como un cilindro. La toma estrioscópica ultrarrápida de imágenes confirma las simulaciones de este tipo, las cuales, a su vez, han realizado grandes aportaciones al campo de la dinámica de fluidos.

Tomamos imágenes de disparos con unos parabalas masivos, el permiso de la policía de la Universidad estatal de Pennsylvania y todas las medidas de seguridad apropiadas. Como las imágenes ultrarrápidas estrioscópicas y umbragráficas se limitaban antes a pequeños campos visuales, generalmente de unos pocos centímetros, sólo se visualizaba una parte de la descarga. Nuestro montaje abarcaba un campo visual de varios metros cuadrados, donde cabía la mayor parte del proceso o todo él.

Durante los primeros milisegundos, la evolución del campo de flujo de un disparo resulta bastante complicada. La balística interior de las armas de fuego no puede observarse con los métodos aquí descritos; el primer fenómeno visible en la boca del cañón es la salida de la onda de choque impulsada por la bala, seguida inmediatamente de la bala misma. A continuación vienen los gases propulsores, producto de la combustión de la pólvora, que se expanden muchísimo cuando pasan de la alta presión del interior del cañón a la presión exterior de sólo una atmósfera. Esa rápida expansión se comporta como una explosión: aparta el aire a los lados y genera así una

GARY S. SETTLES (*arriba*); CORTESIA DE ZONGLIN JIANG, ACADEMIA CHINA DE CIENCIAS, PEQUIN (*abajo*)/*American Scientist*



14. UNA FOTO, OBTENIDA CON UNA EXPOSICION DE 1 microsegundo, de un plátano iluminado directamente revela lo que le ocurre cuando lo atraviesa una bala de rifle del calibre .22. Muestra cuán destructivas pueden ser para los tejidos blandos y las sustancias celulares las balas de gran velocidad y las ondas de choque que las acompañan.

S. S. McINTYRE Y GARY S. SETTLES/*American Scientist*

intensa onda de choque esférica, u *onda expansiva de boca*. El estruendo de un disparo casi siempre se debe a esa onda de boca.

Si el lector tiene alguna vez la mala suerte de que lo tomen como blanco, pero con la buena suerte de que el disparo no le acierte, podrá oír quizás el propio sonido de la bala. La inercia mantiene el movimiento supersónico de las balas, mientras que la intensidad de la onda expansiva de boca, al igual que la onda de choque esférica de una explosión, disminuye rápidamente. La bala adelanta a la onda de boca, arrastrando tras de sí ondas de choque oblicuas. Estas producen la sensación de un chasquido agudo cuando pasa la bala, seguida del estallido de la onda de boca. Esa secuencia varía con los tiempos y con la posición del oyente respecto al trayecto de la bala; cuesta mucho determinar la dirección del disparo a partir de los sonidos percibidos.

El Sistema Estrioscópico a Escala Natural del estado de Pennsylvania es el mayor sistema *schlieren* instalado en un interior, con un campo visual de dos metros por tres. Las fotografías que se toman en esa instalación muestran los fenómenos que acompañan a los disparos a una escala mayor de lo que antes era posible. No sólo captan la balística exterior de la bala, sino también la interacción de la onda expansiva de boca con el tirador. Una protección acústica adecuada es esencial para prevenir las pérdidas de audición. En esa instalación videográfica experimental pueden estudiarse las interacciones del gas propulsor con las manos del tirador, el comportamiento dinámico de los gases de las distintas armas de fuego y muchos otros fenómenos de interés en balística.

Uno de esos fenómenos, por primera vez captado en imágenes por umbragrafía retrorreflectora y videografía ultrarrápida, es la debilitación de la onda de boca de un arma por un silenciador. Los silenciadores, ilegales en muchos lugares, se cree que frenan y enfrían el gas propulsor cuando pasa por la boca. Pero la umbragrafía ultrarrápida revela otro efecto: el silenciador canaliza la expansión lateral del gas propulsor hacia adelante, en forma de chorro supersónico; así se reduce la intensidad de la onda de boca, pero se genera un ruido de chorro. En otras palabras, parte del estallido se convierte en siseo, lo que aminora el nivel de sonido de 10 a 20 dB, o más. Con la toma ultrarrápida de imágenes flujos y la aplicación de los principios de la dinámica de gases pueden conseguirse mejoras en el diseño de silenciadores.

Por último, iluminando directamente los impactos de las balas con una lámpara con destellos que duren un microsegundo se consiguen también imágenes reveladoras, aunque así las ondas de choque y otros fenómenos dinámicos de los gases dejarán de ser visibles. Los impactos balísticos ultrarrápidos no suelen producir orificios limpios en los blancos; arrancan fragmentos de los materiales quebradizos y desorganizan los tejidos blandos. Registramos las imágenes con un disparador electrónico activado por un micrófono, situado fuera del campo visual, que captaba el paso de la onda de choque oblicua del proyectil.

La balística, las ondas de choque y las imágenes ultrarrápidas han sido y siguen siendo cruciales en muchos campos. La observación ultrarrápida de las aplicaciones de las ondas de choque a la medicina y al procesado de materiales es igualmente fascinante. Por el horizonte asoman ya cámaras electrónicas más rápidas, de más de un millón de fotogramas por segundo. Aún queda sitio para idear y aplicar sistemas de toma óptica ultrarrápida de imágenes. El futuro guarda numerosas aplicaciones novedosas de estos experimentos.

El autor

Gary S. Settles enseña ingeniería mecánica y dirige el laboratorio de dinámica de gases en la Universidad del estado de Pennsylvania. Se doctoró en 1976 en la Universidad de Princeton.

Bibliografía complementaria

FULL-SCALE HIGH-SPEED SCHLIEREN IMAGING OF EXPLOSIONS AND GUNSHOTS. G. S. Settles, T. P. Grumstrup, L. J. Dodson, J. D. Miller y J. A. Gatto en *Proceedings of the 26th International Conference on High-Speed Photography and Photonics*, Alexandria, Va., dirigido por D. L. Paisley. SPIE 5580, págs. 60-68; Bellingham, Wash., 2005.

FULL-SCALE HIGH-SPEED "EDGERTON" RETROREFLECTIVE SHADOWGRAPHY OF EXPLOSIONS AND GUNSHOTS. G. S. Settles, T. P. Grumstrup, J. D. Miller, M. J. Hargather, L. J. Dodson y J. A. Gatto en *Proceedings of PSFVIP-5.* 5th Pacific Symposium on Flow Visualisation and Image Processing; Australia, 2005.

FLUID MECHANICS AND HOMELAND SECURITY. G. S. Settles en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 38, págs. 87-110; 2006.

Marc Boada

Generador electroestático de Kelvin

A William Thompson, Lord Kelvin, debemos uno de los generadores eléctricos más curiosos que conozco. La electricidad puede obtenerse por fenómenos muy dispares: desde el efecto fotoeléctrico hasta la deformación de un retículo cristalino. El generador de goteo de Kelvin reviste especial interés porque transforma directamente el potencial gravitatorio en una diferencia de potencial eléctrico.

Se trata de un sencillo aparato que separa las cargas eléctricas positivas y negativas existentes en el agua: las gotículas caen desde un depósito y forman dos hileras que atraviesan unos anillos metálicos para caer finalmente en dos recipientes, donde se almacenan cargas eléctricas opuestas con diferencias de potencial típicas de 10 o 15 kilovolt.

En esta ocasión, nos proponemos construir un dispositivo básico, que el científico experimental podrá perfeccionar, poniendo a prueba su capacidad para hallar soluciones constructivas, prácticas y originales. Pese a la simplicidad de construcción, el artefacto esconde en su funcionamiento detalles nada triviales, que derivan del solapamiento de varios fenómenos.

Empecemos por el fluido eléctrico. En esencia, consiste en el desplazamiento de los electrones en el seno de un conductor metálico sujeto a una diferencia de potencial entre sus extremos. El origen de una diferencia de potencial suele ser electroquímico (como en una batería o una pila) o magnético (como en un generador o una dinamo). En nuestro caso, la diferencia de potencial se debe a fenómenos radicalmente distintos.

Antes de entrar en detalle, observemos cómo opera el dispositivo. De un depósito superior (*A*) sale agua formando dos finos hilos que se rompen en gotas. En ese punto, los hilos atraviesan unos anillos o cilindros metálicos (*B* y *C*) conec-



1. Generador electrostático de Kelvin. Réplica de un diseño de 1907.

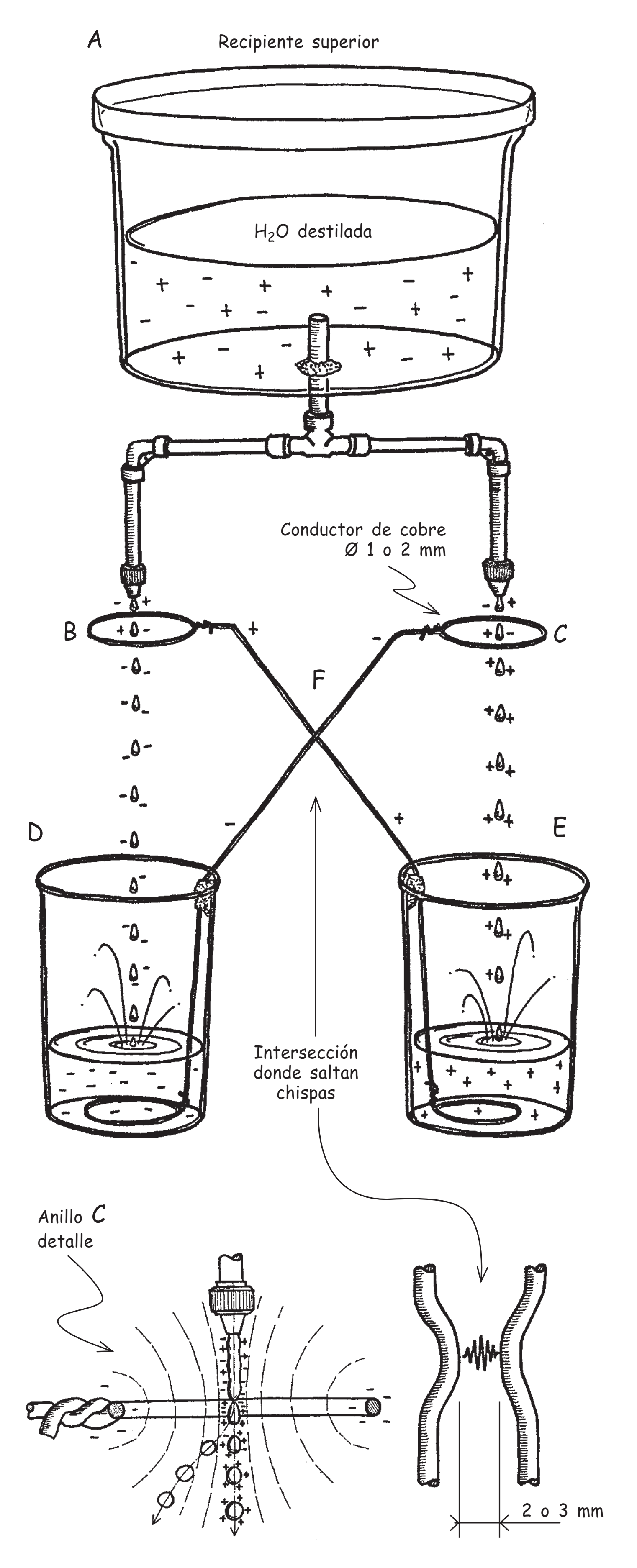
tados eléctricamente en cruz a dos recipientes (*D* y *E*) donde se acumulan las gotas y también las cargas que éstas posean. Al cabo de pocos minutos, entre los dos conductores (*F*) salta una chispa que, en los mejores aparatos, puede llegar a los 10 milímetros de longitud.

El fenómeno se inicia con la caída de las primeras gotas, todas con estado eléctrico idéntico, es decir, dotadas de la misma carga. Por otro lado, los dos anillos conectados en cruz a los recipientes *D* y *E* nunca, o casi nunca, poseen la misma carga eléctrica, pues, como señala Julio Güémez, de la Universidad de Cantabria, basta un rayo cósmico para que exista una diferencia leve.

Aceptemos, pues, que el anillo *C* y, por tanto, el recipiente *D* tienen una carga, por ejemplo, ligeramente negativa respecto del anillo *B* y el recipiente *E*. Cuando una gota atraviesa el anillo *C*, las cargas de signo negativo sufren una repulsión; ello las retiene por encima del anillo. Pasan sólo las positivas, que se acumulan en la gota y caen al recipiente *E*. Así, el anillo *B* adquiere una polarización positiva y de signo contrario a la de *C*, con lo que las gotas que lo atraviesen estarán dotadas de carga eléctrica negativa. Conforme el proceso avanza, las cargas repelidas por cada anillo migran hacia el otro: se establece así un trabajo de cribado eléctrico que separa cargas positivas y negativas a lado y lado del dispositivo. ¿De dónde proceden estas cargas? Cabe recordar que el agua no es un fluido neutro: algunas de sus moléculas (alrededor de una de cada 10^7) se hallan disociadas en iones OH^- y H^+. El paso del fluido a través de los anillos es, por tanto, el responsable de la aparición del voltaje entre los recipientes inferiores.

Lord Kelvin desarrolló este generador en el marco de sus investigaciones sobre la electricidad atmosférica. Usó para ello un fino aerosol de agua. Su dispositivo era más simple: incluía sólo un recipiente de recogida. En una carta de 1859 a Helmholtz, cuenta los detalles y las dificultades técnicas de la experimentación. Explica el funcionamiento del generador, cuyo electrómetro marca, en función de los metales presentes en el instrumento (cobre y zinc), corriente positiva o negativa. Consideraba que la aparición de cargas debía guardar relación con el efecto Volta: la atracción que experimentan dos cuerpos con concentración electrónica distinta. En la actualidad, este fenómeno se engloba dentro de la triboelectricidad, es decir, la generación eléctrica debida a la fricción o proximidad entre materiales distintos. Cuando la electrización se produce por un chorro de aerosol, hablamos de efecto Lenard.

Presentada la teoría, procedamos a recopilar el material necesario para la construcción de un diseño básico. Necesitaremos un recipiente de gran tamaño, de cualquier material y capacidad mediana; debe poderse perforar, para acoplar un tubo que fijaremos mediante resina epoxi. Tras éste situaremos una desviación en "T", dos codos y dos goteadores que obtendremos de un riego gota a gota o de los dispositivos de dosificación utilizados en medicina. Bajo éstos, a unos decímetros de distancia, situaremos dos recipientes de plástico con



ILUSTRACIONES MARC BOADA

DIFERENCIA DE POTENCIAL (KV)	ELECTRODOS ESFERICOS Ø = 25 mm	ELECTRODOS PUNTIAGUDOS
5	1,3	4,2
10	3,0	8,5
15	4,2	13,0
20	5,8	17,5
25	7,6	22,0
30	9,5	26,9
35	11,7	32,0

2. La longitud de la chispa varía también con la forma de los electrodos. En la tabla aparecen valores de longitud de chispa (en milímetros), a presión normal y a 25 grados centígrados, en función de la diferencia de potencial acumulada y del tipo de electrodo empleado.

una capacidad total igual a la del recipiente superior; con un poco de adhesivo, fijaremos en ellos dos alambres de cobre doblados formando anillos de unos 15 o 25 milímetros de diámetro en sus extremos.

Doblándolos con suavidad, ajustaremos las distancias para que cada uno de los anillos por donde pasan las gotas queden a pocos centímetros de la boquilla correspondiente. En el punto de cruce (donde saltarán las chispas), los alambres deben mantener una separación de sólo 2 o 3 milímetros. Llenaremos con agua destilada el depósito superior y ajustaremos los goteadores de forma que la vena fluida que salga de ellos se rompa en gotas algunos milímetros por encima de los anillos. Esperaremos. Pasados algunos minutos, deben saltar pequeñas chispas en el punto donde los conductores se cruzan. En raras ocasiones el experimento funciona a la primera. Podemos estimular la aparición del fenómeno mediante la polarización de uno de los conductores con un tubo de PVC, que previamente habremos frotado enérgicamente con un trozo de celulosa o lana y que deslizaremos cerca del hilo de cobre como si tocáramos el violín.

El ajuste de la velocidad de goteo, que ejerce una notable influencia en la adquisición de carga, constituye quizás el punto más crítico. Con paciencia, comprobaremos que, cuando la carga aumenta, cambia el sonido del goteo; ello se debe a la atracción que las gotas electrizadas experimentan por el anillo que atraviesan, que desvía su trayectoria.

Ello demuestra que el trabajo de cribado (separación) de las cargas eléctricas se realiza a expensas de una reducción en la velocidad de caída de las gotas; es decir: cuanta mayor sea la diferencia de potencial acumulada, mayor habrá sido la reducción de la velocidad de las gotas. Las gotas caen cada vez más despacio por la carga (o la diferencia de potencial) acumulada en cada recipiente. El líquido cargado frena las gotas de la misma carga que van cayendo.

El artefacto admite varias mejoras. En la fotografía se muestra una versión del mismo, basada en un diseño de 1907 publicado por Leo Graetz, que acciona un motor electrostático de Benjamín Franklin [*véase* “Taller y laboratorio”, por C. L. Stong, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1977]. Mediante el uso de recipientes de mayor tamaño y la sustitución de los anillos por cilindros colectores se logra hacer parpadear un pequeño tubo fluorescente o una lámpara piloto de neón. Otra opción, ensayada con excelentes resultados en institutos de enseñanza secundaria, se construye mediante alcachofas de ducha (que hacen la función de goteadores), latas de gran tamaño (recipiente superior) y cubos de zinc perfectamente aislados sobre parafina (recipientes inferiores). Se logran así chispas de más de 10 milímetros de longitud correspondientes a diferencias de potencial de 20 o 30 KV.

Para aumentar la efectividad del experimento, podemos ensayar con nebulizadores de precisión, en los que inyectaremos agua y aire a presión, obteniendo así un aerosol, de forma similar a como lo hacia William Thompson.

El contacto entre el agua y los componentes metálicos produce fenómenos de corrosión que debilitan los contactos eléctricos. Además, como en todo generador de alta tensión, la acumulación de polvo y la humedad atmosférica causan fuertes pérdidas por efecto corona y conducción del aire. Por ello, se recomienda trabajar en un entorno cálido y seco, así como mantener perfectamente limpios los conductores, que puliremos, para obtener una carga eléctrica máxima, hasta convertirlos en espejos anamórficos.

EL EFECTO LENARD

El efecto Lenard corresponde a una manifestación triboeléctrica: describe la aparición de cargas eléctricas en el aire debido a la pulverización del agua. Lo habitual es que el aire adquiera carga negativa, puesto que las cargas positivas caen junto con gotas de gran tamaño formadas por coalescencia. De ahí que este fenómeno se denomine también electricidad de cascada o de pulverización. Se origina con la aparición de capas eléctricas dobles en la superficie de las gotas que se rompen por la fricción con el aire. A ello se suma que en las proximidades de un metal la electricidad surge a cuenta de la separación electrolítica de estas capas.

Amén de ser el responsable del funcionamiento del generador por goteo de Kelvin, el efecto Lenard produce peligrosas acumulaciones de carga eléctrica en saltos de agua, aviones, instalaciones de pintura industrial y en la limpieza a presión de grandes tanques de combustible donde, en ocasiones, ha causado graves explosiones.

Juan M.R. Parrondo

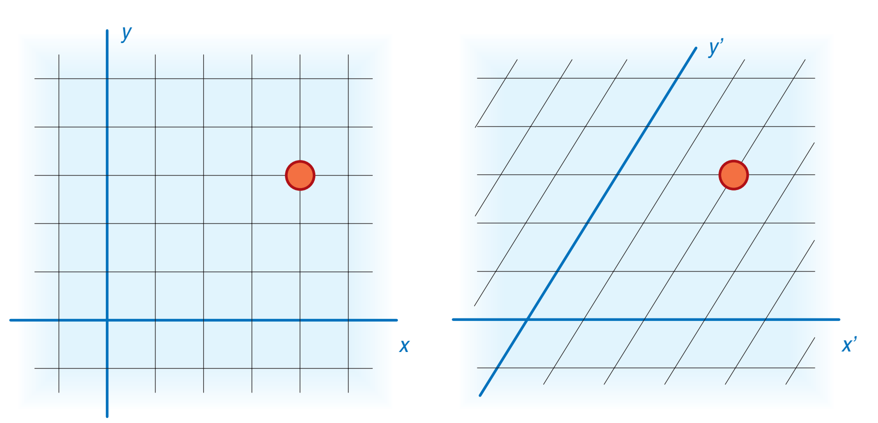
El espacio-tiempo

Cuando en física se dice que el espacio-tiempo tiene cuatro dimensiones, queremos decir simplemente que, para ubicar un suceso, basta con dar cuatro números: las tres coordenadas del punto espacial donde el suceso ocurre y el instante de tiempo en el que ocurre. La palabra "punto del espacio-tiempo" tiene un significado bastante ramplón: no es más que un lugar y una fecha.

¿Por qué entonces tanto misterio en torno al espacio-tiempo y sus cuatro dimensiones? Desplegar el tiempo sobre una dimensión significa dotarlo de una cierta "espacialidad" y poner en un mismo nivel los acontecimientos pasados, presentes y futuros. Esto tiene un indudable atractivo. Pero el espacio-tiempo ha adquirido una significación mucho más potente e inesperada gracias a la teoría de la relatividad, al demostrar que ambos tipos de "coordenadas", las espaciales y la temporal, no son independientes entre sí, sino que se entremezclan de forma sorprendente y contraria a la intuición.

Antes de adentrarnos en los misterios del espacio-tiempo, conviene que recordemos las diferentes formas de asignar coordenadas a los puntos de un plano. La forma más habitual es trazar dos ejes perpendiculares, como en la figura 1 (*izquierda*). A partir de estos dos ejes se puede dibujar una malla formada por líneas paralelas a los ejes y separadas entre sí por una unidad de longitud, por ejemplo un centímetro. Esta malla define las coordenadas de cada punto. Las del punto rojo de la figura izquierda son (4 cm, 3 cm). De la misma forma, se pueden encontrar las coordenadas de todos los puntos de la malla, y en general, utilizando números decimales, de cualquier punto del plano.

Existen otras formas de asignar coordenadas que no son tan habituales. En la figura 1 (*derecha*) se muestra un ejemplo en el que los ejes no son perpendiculares. Sin embargo, se puede también dibujar una malla mediante líneas paralelas a los mismos y asignar coordenadas de forma similar a nuestro primer ejemplo. En este caso, el punto rojo (que es el mismo que en el dibujo de la izquierda) tiene coordenadas (2 cm, 3 cm). El punto es el mismo en los dos dibujos; sin embargo, sus coordenadas son distintas porque hemos cambiado los ejes. Este cambio es parecido a lo que le ocurre a una magnitud cuando se expresa en distintas unidades: 10 centímetros y 0,1 metros son la misma distancia, aunque su expresión numérica depende obviamente de las unidades. Con un punto del espacio pasa lo mismo: puede tener expresiones numéricas diferentes, es decir, coordenadas diferentes, según los ejes que utilicemos. Pero, ¿para qué necesitamos diferentes ejes? ¿No basta con los habituales ejes perpendiculares?

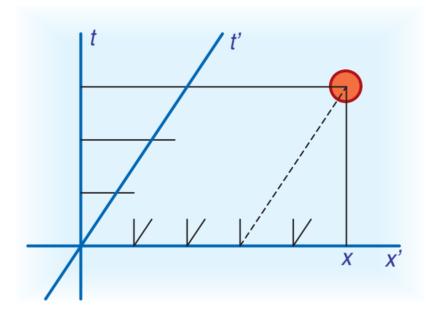


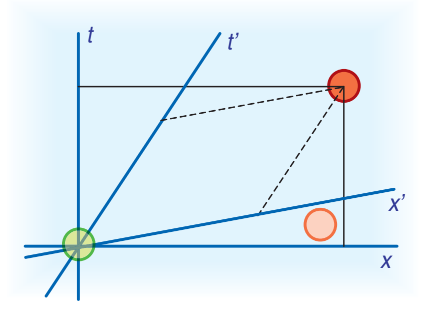
1. Coordenadas en el plano. El *mismo* punto (*círculo rojo*) tiene coordenadas $x = 4$, $y = 3$, con respecto a los ejes perpendiculares de la izquierda, y coordenadas $x' = 2$, $y' = 3$, con respecto a los ejes oblicuos de la derecha.

Utilizar distintos ejes sirve para entender cómo dos observadores pueden ver la misma realidad de distinta forma. Lo podemos comprobar con un ejemplo sencillo, en donde el espacio tiene sólo una dimensión y, por tanto, el espacio-tiempo es bidimensional. Supongamos que dos observadores sincronizan sus relojes en un determinado instante y lugar, es decir, en un determinado punto del espacio-tiempo. Los dos observadores colocan su origen de posiciones y de tiempos en este punto, que tendrá coordenadas (0,0) para ambos. Supongamos ahora que el primero de los observadores, *O*, permanece quieto y el segundo, *O'*, se mueve a una velocidad *v*. Si el primero de ellos asigna unas coordenadas (x,t) a un punto del espacio-tiempo, ¿cuáles son las coordenadas (x',t') que asignará el segundo a ese mismo punto? La respuesta más intuitiva coincide con el análisis de Galileo. En primer lugar, el tiempo es universal: los dos observadores datarán un evento con la misma coordenada temporal. En otras palabras, hoy es 5 de mayo tanto para usted, que está sentado en su casa leyendo, como para mí, aunque esté viajando en un tren a 100 kilómetros por hora. Matemáticamente: $t' = t$. A la coordenada espacial no le ocurre lo mismo. Puesto que *O'* se mueve a velocidad *v*, verá alejarse el origen, que ya no tendrá coordenada espacial cero. La coordenada espacial para *O'* es $x' = x - vt$. En efecto, si la velocidad *v* es positiva, el observador *O'* se moverá hacia la derecha y verá cómo el origen $x = 0$ se aleja de él hacia la izquierda, de modo que le asignará una coordenada espacial negativa $x' = -vt$. La *transformación de Galileo*:

$$x' = x - vt \qquad t' = t$$

indica cómo se relacionan las coordenadas que el observador *O* y el observador *O'* asignan al *mismo* punto del espacio-tiempo. ¿Qué aspecto





2. Ejes de coordenadas en el espacio-tiempo para un observador en reposo y otro que se mueve hacia la derecha según Galileo (*izquierda*) y según Einstein (*derecha*).

tiene la transformación de Galileo? ¿Cómo son los ejes coordenados de *O* y de *O*' en el espacio-tiempo? La respuesta se muestra en la figura 2 (*izquierda*), para un observador *O*' que se mueve con respecto a *O* a una velocidad de 2/3 metros por segundo hacia la derecha. Como se puede apreciar, los ejes espaciales de ambos observadores coinciden, mientras que el eje temporal de *O*' está inclinado con respecto al de *O*. No he dibujado el mallado completo, como en la figura 1, sino sólo las líneas cercanas a los ejes, para no complicar demasiado la figura. El punto rojo tiene coordenadas $x = 5$, $t = 3$, para *O*, y $x' = 3$, $t' = 3$, para *O*', de acuerdo con las transformaciones de Galileo.

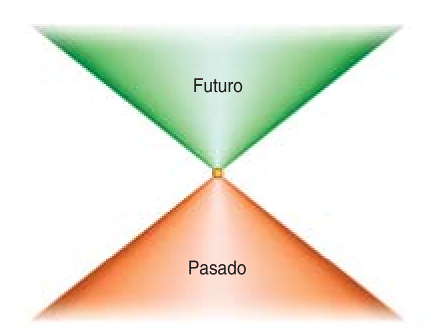
Observen que los segundos del eje temporal *t*' tienen una mayor longitud que los de *t*. Así debe ser si queremos reproducir gráficamente las transformaciones de Galileo. A primera vista es también curioso que los ejes espaciales de *O* y de *O*' coincidan y los ejes temporales difieran, mientras que ocurre lo contrario con las coordenadas. Reflexionando un poco, el lector puede comprobar que los ejes espaciales tienen que coincidir para que $t = t'$. De hecho, el eje temporal de *O*' está definido por los puntos con $x' = 0$, es decir, por la propia trayectoria de *O*'.

¿Qué ocurre en la teoría de la relatividad? Einstein descubrió que las transformaciones de Galileo debían ser sustituidas por las llamadas *transformaciones de Lorentz*:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

en donde *c* es la velocidad de la luz. Si la velocidad del observador *O*', *v*, es muy pequeña comparada con la velocidad de la luz, es fácil ver que las transformaciones de Lorentz son aproximadamente iguales a las de Galileo. Sin embargo, hay dos grandes diferencias entre ambas. En primer lugar, el denominador en las transformaciones de Lorentz hace que tanto el espacio como el tiempo se "contraigan" para *O*': las distancias serán más cortas y los objetos más pequeños en la dirección de su movimiento. La segunda y más importante diferencia es que el tiempo ya no es universal, sino que la coordenada temporal se mezcla con la espacial a través del término vx/c^2. En consecuencia, los ejes espaciales de los dos observadores ya no coinciden, como se ve en la gráfica de la derecha de la figura 2. El tiempo deja de ser absoluto. Por ejemplo, para *O*' los puntos que están sobre el eje *x*' son simultáneos, es decir, a todos ellos *O*' les asigna la misma coordenada temporal $t' = 0$. Sin embargo, para *O* esos mismos puntos tienen distinta coordenada temporal, creciente según nos movemos a lo largo del eje hacia la derecha. En pocas palabras, la simultaneidad es relativa. Incluso el orden temporal es relativo: para *O* el círculo rojo claro de la figura es posterior al verde, mientras que para *O*' es anterior en el tiempo.

Esta relatividad del orden temporal plantea enseguida un problema adicional: ¿qué ocurre si en un punto A del espacio-tiempo ocurre algo que es causa de un evento en un punto B? ¿Vería entonces *O*' el efecto antes de la causa? Uno de los principios básicos de la teoría de la relatividad impide este tipo de paradoja: nada puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz, ni cuerpos materiales ni información. Por lo tanto, lo que ocurre en A puede ser causa de lo que ocurre en B sólo si estos dos puntos del espacio tiempo pueden "comunicarse" entre sí a través de un rayo de luz o de algo que viaje más despacio que la luz. Esta limitación se representa gráficamente en la figura 3. El punto amarillo en el centro del dibujo sólo puede influir sobre el triángulo verde en el espacio-tiempo y sólo puede ser influido por sucesos ocurridos en el triángulo rojo. Son en realidad, y respectivamente, el futuro y el pasado del punto amarillo, si entendemos por pasado aquello que podemos recordar o que nos puede influir y por futuro aquello en lo que aún tenemos la posibilidad de intervenir. Estos triángulos de causalidad no dependen del observador. Por lo tanto, entendidos de esta forma, el pasado y futuro de cualquier punto del espacio-tiempo son absolutos. Por ejemplo, el orden temporal del punto rojo claro y del verde en la figura 2 (*derecha*) es diferente para *O* y para *O*', como ya hemos visto. Sin embargo, el punto rojo no es futuro ni pasado del verde, y viceversa.



3. Pasado y futuro según la teoría de la relatividad.

Con ello la teoría de la relatividad recupera toda su coherencia. Sin embargo, hay algo en el espacio-tiempo einsteiniano que sigue siendo enigmático, especialmente cuando uno considera sucesos aleatorios. Nos parece que la tirada de un dado establece de forma nítida un "antes" y un "después", un universo antes de la tirada y un universo después de la tirada, incluso aunque puntos de ese universo no puedan verse en absoluto influidos por el resultado de la tirada. Sin embargo, un observador puede considerar la tirada anterior a cierto evento, mientras que otro observador la puede considerar posterior. La inclusión del azar en el espacio-tiempo einsteiniano parece problemática, a pesar de no producir paradojas de causalidad. A este tema dedicaremos probablemente alguna reflexión en el futuro.

Mark Fischetti

CARRETERAS

Preparando el terreno

¿Qué se oculta bajo el pavimento de una carretera? Mucho más que la capa de brea que se vierte en caliente.

La propia terminología constituye una buena fuente de información acerca de la construcción de carreteras. Al ingeniero escocés John Adams se le atribuye el mérito de haber proyectado las primeras carreteras modernas, en los albores del siglo XIX, construidas mediante la compresión de gruesos depósitos de piedras aristadas y machacadas. Más tarde, se añadiría alquitrán caliente para trabar la capa superior, consiguiendo así caminos de "tarmacadam" o, simplemente, tarmac. Si bien el término persiste, el método hace décadas que no se usa (ni siquiera en los aeropuertos de los países de habla inglesa, donde las pistas se conocían como tarmac). Hacia finales del siglo XIX, el asfalto se había convertido en el ligante preferido.

Hoy las carreteras de asfalto dominan el paisaje. Les siguen las de hormigón y las de "árido suelto", la grava. En los tres casos, se disponen en capas formadas por piedras troceadas, progresivamente más finas, más densas y más duras. Las capas superiores de asfalto u hormigón reducen el desgaste; son estancas al agua, causa de agrietamiento. Las fisuras suelen propagarse desde el fondo cuando los estratos se mueven o se erosionan. Para repararlas, los equipos de mantenimiento suelen añadir otra capa. Pero si el daño es extenso, podrían rebanar unos cuantos centímetros y modificar el firme.

Entre las novedades recientes se cuentan los "firmes perennes". Se construyen sobre un asiento de asfalto, caro pero más resistente, que se supone soporta el deterioro el doble de tiempo que las estructuras al uso. También los diseños de matriz de piedra, en los que el tamaño y forma de las piedras que sustentan las capas superiores se someten a un fino control, prometen una larga duración. En Europa son ya habituales; en EE.UU. se está extendiendo su uso. Los pavimentos porosos, en los que el agua se infiltra, en vez de correr por la superficie, se están ensayando en estacionamientos.

Los defensores del asfalto y del hormigón aducen diversas razones sobre las composiciones mejores de cada aplicación. En última instancia, sin embargo, la decisión responde a criterios económicos. Según los expertos, deben considerarse los costes asociados a todo el ciclo de vida: los materiales y la mano de obra, el tiempo necesario para construir la carretera (y, por tanto, de alteración del tráfico), la durabilidad, el mantenimiento y la reparación. Un estudio que puede resultar nebuloso y vago.



1. EL FIRME DE UNA AUTOPISTA DE ASFALTO consta de varias capas. El terreno se compacta; luego se cubre de piedras, que también se compactan. A continuación, se extiende la capa de asiento: una mezcla de piedras machacadas (el árido), de unos 40 milímetros de diámetro, y asfalto líquido caliente. Se añaden la capa de ligazón y la exterior, cuyos áridos son gradualmente más menudos, más duros y más aristados (hasta llegar a unos 40 milímetros); cuando el asfalto los empasta quedan mejor trabados. En las carreteras locales se emplean capas similares pero menos gruesas. Los pavimentos de asfalto se flexan levemente, de forma que transmiten hacia abajo la tensión asociada a la carga del vehículo.



2. EL FIRME DE UNA AUTOPISTA DE HORMIGON se tiende sobre terreno compactado con un asiento de áridos comprimidos. Sobre ellos se forma una capa gruesa de hormigón mediante placas unidas por pasadores de acero; se mantiene húmeda durante días hasta que fragua. Para impedir el resquebrajamiento debido a la dilatación y la contracción térmicas, entre placa y placa se abre una juntura que se rellena de un obturador estanco. Los pavimentos de hormigón son rígidos; transmiten la carga sobre una zona poco profunda, aunque más ancha.

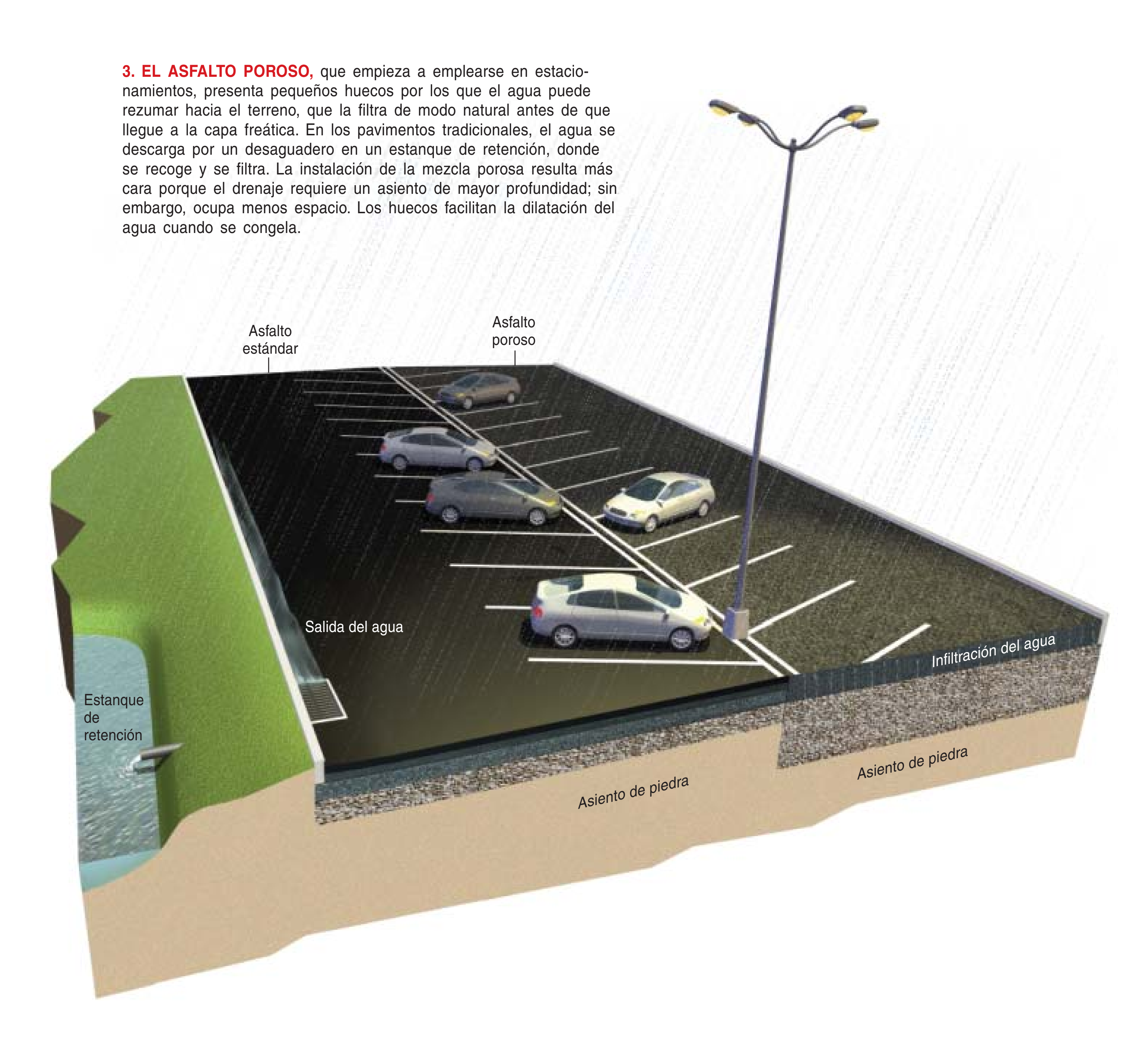
GEORGE RETSECK

➤ UN HECHO EN FRIO: ¿Por qué un puente puede helarse antes que la superficie de la carretera? Respuesta: Entre la superficie y el fondo del pavimento se establece una corriente de aire frío que no tarda en eliminar todo vestigio de calor conforme la temperatura ambiente desciende por debajo de cero grados, con la formación consiguiente de hielo. En comparación, sólo la superficie de la carretera se enfría; el calor procedente de la parte inferior la mantiene por encima de cero grados, al menos durante cierto tiempo. Además, la mayoría de las calzadas de los puentes se construyen con acero y hormigón, que se enfrían antes que el asfalto, un mal conductor.

➤ CONSERVESE CALIENTE: El "asfalto" se compone de un 95 por ciento de piedra pulverizada y un cinco por ciento de asfalto líquido, que liga el agregado. En la fábrica, la piedra se machaca, se seca y se calienta hasta unos 150 grados Celsius, mientras sobre ella se vierte el asfalto. Esa mezcla se guarda caliente en un silo aislado durante varios días sin añadirle más calor. Luego, se introduce en un camión volquete y se transporta hasta la asfaltadora a pie de obra, donde se mantiene todavía fluido a unos 135 grados Celsius. Las primeras referencias a este material nos retrotraen a la Babilonia del año 600 antes de nuestra era. En muy pocos lugares se encuentran lagos de asfalto natural. Trinidad es uno de ellos. La mayor parte del asfalto se obtiene como subproducto del refino del petróleo.

➤ GRAVILLA: Para mejorar los caminos de grava a un precio mínimo, se rocían superficialmente con asfalto pastoso, que forma una película; se esparce luego gravilla y sobre el conjunto se pasa una apisonadora. De esta forma, los materiales se funden y crean un modesto revestimiento estanco de gravilla, que reduce la formación de rodadas y la fisuración.

3. EL ASFALTO POROSO, que empieza a emplearse en estacionamientos, presenta pequeños huecos por los que el agua puede rezumar hacia el terreno, que la filtra de modo natural antes de que llegue a la capa freática. En los pavimentos tradicionales, el agua se descarga por un desaguadero en un estanque de retención, donde se recoge y se filtra. La instalación de la mezcla porosa resulta más cara porque el drenaje requiere un asiento de mayor profundidad; sin embargo, ocupa menos espacio. Los huecos facilitan la dilatación del agua cuando se congela.



Ilustración

De la teoría a la aplicación técnica

WORLDS OF FLOW. A HISTORY OF HYDRODYNAMICS FROM THE BERNOULLIS TO PRANDTL, por Olivier Darrigol. Oxford University Press; Oxford, 2005. DIE WERKE VON DANIEL BERNOULLI. BAND 8 TECHNOLOGIE II. Introducción y comentarios de Frans A. Cerulus. Birkhäuser Verlag; Basilea, 2004.

THE HEIRS OF ARCHIMEDES. SCIENCE AND THE ART OF WAR THROUGH THE AGE OF ENLIGHTENMENT. Dirigido por Brett D. Steele y Tamara Dorland. The MIT Press; Cambridge, Mass., 2005.

PIERRE SIMON LAPLACE 1749-1827. A DETERMINED SCIENTIST, por Roger Hahn. Harvard University Press; Cambridge, 2005. LE SYSTÈME DU MONDE. PIERRE SIMON DE LAPLACE. UN ITINÉRAIRE DANS LA SCIENCE, por Roger Hahn. Editions Gallimard; París, 2004.

Al mandamiento único de la geometrización de la mecánica podría reducirse el programa de la ciencia moderna. Para Commandino, Guidobaldo y Stevin, con relación a la estática, para Galileo, Descartes, Huygens y Newton con respecto a la dinámica, el modelo del rigor científico era, sin disputa, Arquímedes, que postuló el centro de gravedad y su empleo en la ley de la palanca, descubrió la gravedad específica, o densidad, determinó la cuadratura de la parábola, articuló los principios fundamentales de hidrostática e inventó el tornillo hidráulico (*The Heirs of Archimedes. Science and the Art of War through the Age of Enlightenment*).

Arquímedes representa el ideal del científico que sueña con la virtualidad aplicada o técnica de su lucubración para domeñar y transformar el mundo. O al menos mantener la integridad del suelo patrio. Diseñó ingenios contra el asedio romano de Siracusa durante la segunda guerra púnica, cuando la ciudad-estado se alineó con las fuerzas cartaginesas de Aníbal. El sistema defensivo de Arquímedes frustró los asaltos iniciales desde mar y tierra. Lo cuenta el historiador Polibio (200-118 a.C.). En el comienzo de la era moderna, matemáticos, químicos y filósofos naturales, con ingenieros militares, navegantes y oficiales de artillería, siguieron las huellas de Arquímedes y aunaron teoría científica y arte militar. Pero ya a finales del siglo XV y principios del XVI se había producido la restauración matemática arquimedeana durante las guerras Hasburg-Valois, con participación de matemáticos de orientación ingenieril, como Maurolico.

En ingeniería naval dejó su sello Daniel Bernoulli con tres memorias premiadas por la Academia de Ciencias de París en los años 1737, 1755 y 1757 (*Die Werke von Daniel Bernoulli*). En este segundo volumen consagrado a la técnica se incluyen, además, un texto divulgador de astronomía (sobre la posibilidad o no de determinar con certeza absoluta si la Tierra se halla en movimiento o en reposo), escrito con N. Delisle, en 1728, y la teoría de la bomba espiral, de 1772. Este ingenio, constituido por un tambor metálico y cilíndrico en cuyo interior hay una hoja espiral, parecida a un muelle de reloj, y que había sido construido en 1746 por Andreas Wirtz, y refinado por Bernoulli, elevaba agua del río Limmat hasta una altura de 18 pies.

Se habría familiarizado con las cuestiones navales durante su estancia temprana en San Petersburgo, cuyo puerto se hallaba entonces en construcción. Pero el autor de la *Hydrodynamica* (*Worlds of Flow. A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*) se daba perfecta cuenta de que la sistematización matemática y mecánica podía remediar el empirismo de los ingenieros navales, una esperanza compartida por la Academia cuando propuso el temario de los premios. Bernoulli participó trece veces en la competición de París y ganó en diez; también se llevó el galardón en la única convocatoria de Berlín a la que acudió. Varias de las ideas avanzadas en las memorias se han convertido ya en doctrina común de la construcción naval.

Para el premio de 1735 la Academia planteó la siguiente cuestión: "¿Cuál debe ser la mejor factura de las anclas, con relación a su figura y forja, y cuál es la forma mejor de someterlas a prueba?" Las mejores memorias recibidas habían respondido bien una parte de la cuestión, pero habían fracasado en otras. Pero el premio exigía una respuesta satisfactoria a todo el planteamiento. Así las cosas, la Academia decidió volver a proponer el tema en 1737, ahora dividido en tres cuestiones distintas, dotada cada una de un premio por separado: 1) ¿Cuál es la forma más adecuada que pudiera darse a un ancla? 2) ¿Cuál es la forma mejor de forjar anclas? 3) ¿Cuál es la forma mejor de probar las anclas? Bernoulli se llevó medio premio de la cuestión tercera, otorgándose la otra mitad del tercer premio al marqués de Polani, de Padua. Bernoulli examinaba en su memoria ("Réfléxions sur la meilleure figure à donner aux Ancres, et la meilleure manière de les essayer") dos cuestiones: por qué funciona la forma tradicional del ancla y cuánta fuerza ejercida por el barco se transmite al ancla.

En 1753 la Academia retaba a la comunidad científica con otro problema de ingeniería naval: "Formas que ofrezcan la mayor ventaja en la sustitución del viento en los barcos, sea por aplicación de remos o mediante cualesquiera otros medios". Se recibieron nueve memorias. El

premio recayó en Bernoulli ("Recherches sur la manière la plus avantageuse de suppléer à l'action du Vent sur les grands Vaisseaux, soit en appliquant les Rames, soit en y employant quelqu'autre moyen que ce puisse être. Fondées sur une nouvelle Théorie de l'économie des forces et de leurs effets"). Desarrollaba tres puntos de notable interés: el concepto de fuerza, que lo había introducido ya en la *Hydrodynamica*, pero noción aquí central junto con la idea de uso eficiente de la fuerza; nuevas formas de remos o aletas mecánicas inventadas por Bernoulli y la evaluación de su eficiencia; el recurso a los chorros de agua para propulsar, por reacción, un barco, idea ésta que ya apareció también en la *Hydrodynamica*. De acuerdo con la física de su tiempo, distinguía una fuerza viva (*vis viva*) de una fuerza muerta (*vis mortua*). En el origen de las fuerzas vivas se encontraban las que estaban continuamente activas, como la gravitación; los cantos rodados se encuentran, en cambio, sometidos a una fuerza muerta. La fuerza viva, por antonomasia, de Bernoulli es la energía cinética.

Bernoulli publicó en 1738 su *Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii* ("Hidrodinámica, una disertación sobre las fuerzas y movimientos de los fluidos"), donde acuñaba el término *hidrodinámica* para designar un nuevo enfoque unificado de la hidrostática e hidráulica. Introdujo el concepto de trabajo (*vis absoluta*) realizado por las máquinas hidráulicas e inauguró la teoría cinética de los fluidos elásticos. Basó su hidrodinámica en el principio de equivalencia entre ascenso potencial y descenso real. El ascenso potencial correspondía a nuestra energía cinética dividida por el peso total; el descenso real correspondía a la energía potencial de signo inverso dividida por el peso total. Con todo, su aplicación más innovadora se centraba en la presión ejercida por un fluido en movimiento sobre las paredes de la vasija que lo confinaba. Los autores que le precedieron en el estudio de la hidráulica e hidrostática consideraron sólo la presión hidrostática debida a la gravedad. Para Bernoulli, la presión ejercida por un fluido en movimiento sobre las paredes es menor que la presión estática.



1. Remolinos creados por la inestabilidad del flujo debida a mareas imponentes que rompen con un peñasco.

La convocatoria de la Academia para el año 1755 versó sobre la forma mejor de reducir el balanceo y cabeceo de las embarcaciones. Bernoulli tituló su memoria: "Principes Hydrostatiques et Méchaniques sur la question proposée pour la seconde fois par l'Académie Royale des Sciences: Quelle es la meilleure manière de dominuer le Roulis et le Tangage d'un Navire, sans qu'il perde sensiblement par cette diminution aucune des bonnes qualités que sa construction doit lui donner". Con ella ganó su décimo y último galardón de París. En la primera mitad de un ensayo que aborda el equilibrio y las oscilaciones del barco en aguas tranquilas y en aguas movidas, avanza sobre fórmulas que había ya publicado en *De statu aequilibrii corporum humedo insidentium* (1738) y *De motibus oscillatoris corporum humido insidentium* (1739).

La aplicación militar gira, sobre todo, en torno a la pólvora, su fabricación a partir de azufre, carbón vegetal y salitre. Cada uno de los componentes planteaba una serie de retos a propósito de su suministro y purificación. Se trataba de encontrar las proporciones requeridas para un producto óptimo. En realidad, el ensayo con la pólvora entrañaba un auténtico revulsivo para la química. En el curso de su investigación se descubrieron nuevos gases: el "aire fijo" y el "aire inflamable". Se fue así configurando una química pneumática.

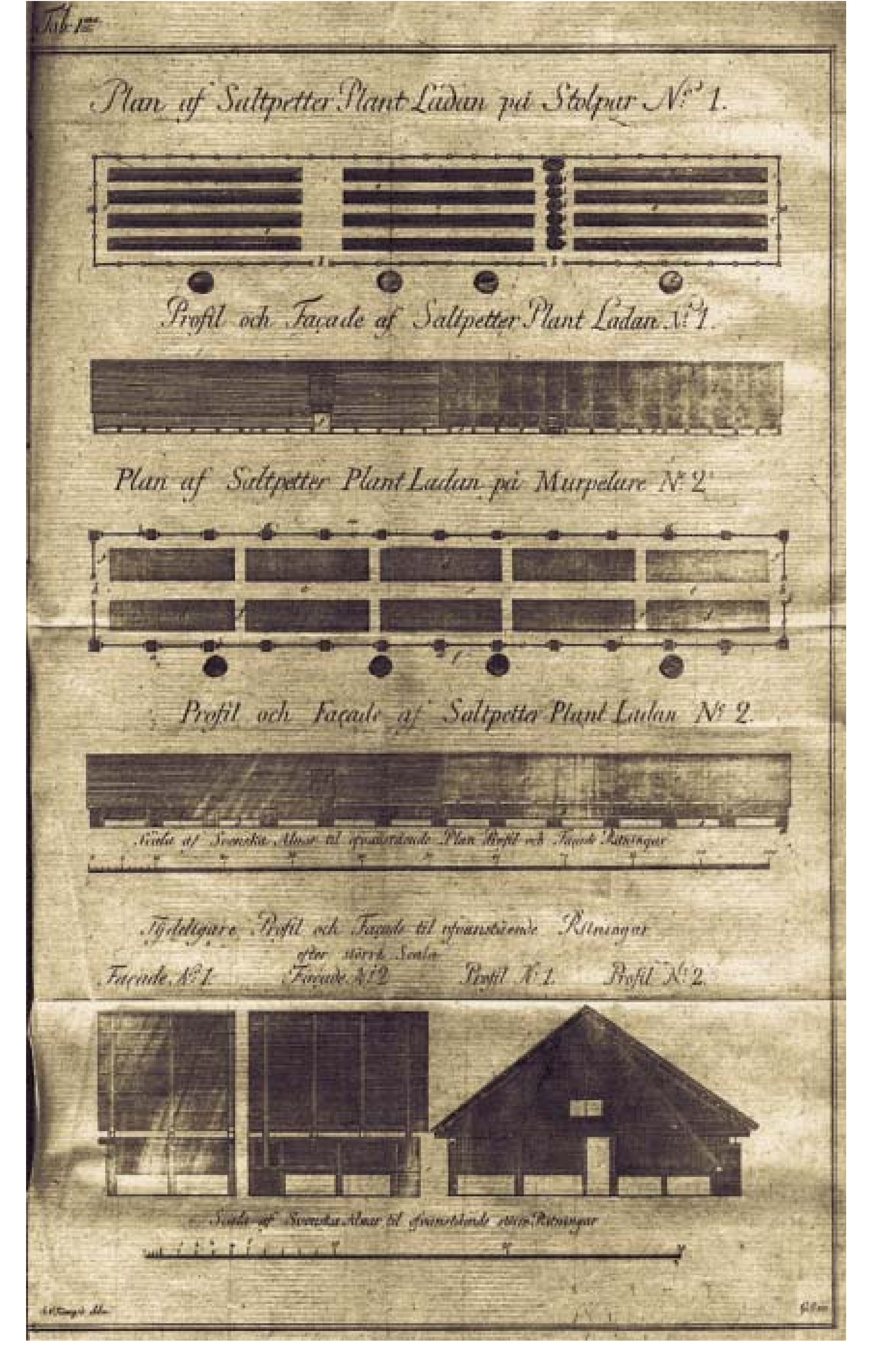
Además, desde finales del siglo XVII se viene asistiendo a la liberalización y demanda creciente de pólvora para minería y comercio. El mercado libre coincidió con el comienzo de las investigaciones de la Regia Sociedad de Londres sobre intensificación de la explosión. Si Robert Hooke propuso ya

métodos para determinar la fuerza de la pólvora, Robert Boyle se ocupó de la expansión de la explosión. Inglaterra podía importar nitratos, o salitre, de la India. No así Suecia, que tuvo que extraer el salitre de las comunidades rurales para satisfacer sus necesidades militares, exigencias que forzaron una de las creaciones más rentables del siglo XVIII: los hórreos de salitre. Por esa vía entró el discurso químico en la producción de munición.

La fabricación de pólvora en Inglaterra empieza en el siglo XVI con la contratación de artesanos extranjeros y el establecimiento de los lechos de salitre. Cobra particular impulso con las guerras de los decenios centrales de la centuria siguiente y culmina, tras una expansión de su uso en minería, comercio y asentamientos coloniales, en la restauración de la Oficina de Ordenanzas desde los años cuarenta del siglo XVIII con el nombramiento de Charles Frederick. En un memorándum de 1747, se indica que la pólvora de mejor calidad se fabrica a partir de 64 o 70 libras de salitre, 18 libras de azufre y 18 libras de carbón vegetal. Los químicos ingleses refinaron las mediciones de volúmenes y estudiaron la naturaleza del "aire" liberado durante la explosión de la pólvora. Así, de Stephan Hales y Benjamin Robins a Joseph Priestley.

Por lo que concierne a Suecia, el salitre había constituido un recurso importante en la fabricación de pólvora, aproximadamente tres cuartas partes de su peso. Los otros componentes —de 10 a 15 por ciento de azufre y de carbón vegetal— abundaban en yacimientos de pirita y en bosques caducifolios; pero el salitre escaseaba y el estiércol empleado para su fabricación era detraído de los campesinos. A lo largo del siglo XVIII el salitre se convirtió en objeto de intereses contrapuestos entre campesinos, militares y mineros, aunque también en objeto de investigación científica avalada por las universidades de Uppsala y Lund, la Academia de Abbo y la Academia de Ciencias de Estocolmo. Todos los empeños cristalizaron en una sencilla innovación, que permitió elevar la productividad de salitre. Tal fue su éxito, que los hórreos de salitre se difundieron por Alemania y Francia.

En francés se escribieron los mejores tratados de ese tiempo sobre la pólvora. Apareció en la *Encyclopédie* de Diderot y recibió un análisis extenso en la *Chymie expérimentale et raisonnée* de Antoine Baumé. Durante el período napoleónico, apareció el *Traité de l'art de fabriquer la poudre à canon* por Jean Joseph Auguste Botté de Toulmont y Jean René Denis Riffault. Pero su investigación sistemática va asociada al nombre de Antoine Lavoisier, quien identificó el proceso de la explosión de la pólvora con un proceso de combustión. Uno de sus experimentos clave —la determinación de la naturaleza del ácido nítrico en 1776— se desarrolló en el curso de su estudio de la química del salitre. Promovió entonces la sustitución de la ceniza de madera por potasa pura en el refinamiento del



2. Dos tipos de hórreos de salitre, en visión superior, lateral y frontal.

salitre, factor decisivo en el aumento de la producción anual de salitre bajo la *Régie des Poudres*.

A lo largo de sus últimos años, contó Lavoisier con la colaboración del que sería llamado el Newton francés (*Pierre Simon Laplace 1749-1827* y *Le système du monde. Pierre Simon de Laplace*. Se trata de la misma obra, con una peculiaridad: la edición traducida, la francesa, apareció antes que la original inglesa). Laplace acompañó la delegación encargada de observar, el 26 de febrero de 1777, los experimentos de Lavoisier sobre diversos gases. La competencia adquirida en instrumentos de medición le valió para autentificar tan delicados ensayos de laboratorio. Parece que el propio Lavoisier le había pedido ayuda con anterioridad para comparar los termómetros y así determinar el rigor exacto del invierno de 1776. Los primeros contactos entre Laplace y Lavoisier estuvieron ligados a mediciones de temperatura y presión en el momento en que una sustancia pasa de un estado líquido a un estado gaseoso. Pensaba Laplace que todo cambio de estado iba acompañado de una producción o de una liberación de fluidos imponderables (entendiendo por tales el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo).

Pero el genio de Laplace no brilló tanto en la creación o intuición cuanto en la síntesis y sistematización de ideas recibidas o ajenas. Dominó la vida científica de Francia durante casi medio siglo. Expuso con claridad cartesiana la mecánica. Generaciones de científicos han aprendido en sus textos a manejar el cálculo infinitesimal y la teoría de probabilidades. Laplace había nacido en Beaumont-en-Auge en el seno de una familia de campesinos acomodados de las tierras fértiles de la baja Normandía. Tras una primera formación humanística, completada con nociones de álgebra y geometría analítica, pasó a la Universidad de Caen, donde estudió artes y sopesó la posibilidad de dedicarse al ministerio sacerdotal. Idea que abandonó tras su instalación en París, donde buscó el amparo inmediato de d'Alembert, con veinte años escasos y un ensayo de cuatro páginas donde sometía a criba la ley de inercia interpretada por el padre de la Enciclopedia. Con su ayuda se le concede una plaza docente en la Escuela Real Militar. Laplace pasaba largas horas en la biblioteca del centro, absorto en el estudio de las eulerianas *Introductio in analysin infinitorum*, *Institutiones calculi differentialis* y las *Institutiones calculi integralis*. No menos veneración profesó a Lagrange, con la elegancia de sus soluciones matemáticas a todo tipo de problemas mecánicos; de hecho, su primer ensayo matemático, de marzo de 1770, abordaba la manipulación de mínimos y máximos en una familia de funciones, inspirado en Lagrange, quien proponía una demostración analítica de una de las proposiciones de Euler.



3. Grabado de Pierre Simon Laplace (1749-1827), por J. Bosselwhite.

En su concepción determinista del universo, Laplace depende de Condorcet. Así, comenzó por ver en la gravitación universal una verdad susceptible de englobar todo lo real. La consideraba una fuerza que intervendría no sólo en el dominio macroscópico del sistema solar, donde había evidencia de su poder, sino también en la física terrestre; más aún, constituiría el principio central de las leyes que regían la química, la mineralogía y las ciencias naturales. Expone en 1773: "El estado presente del sistema de la naturaleza constituye una continuación de lo que era un momento antes, y si concebimos una Inteligencia que, por un instante dado, abrace todas las relaciones de los seres de este universo, podrá determinar para un tiempo cualquier tomado en el paso o en el futuro, la posición respectiva, los movimientos y, en general, las afecciones de todos los seres".

El azar, expondrá en su teoría de las probabilidades, no es la ausencia de causa en la naturaleza, sino el signo de que el hombre ignora dicha causa. Lejos de remitir a una entidad en sí misma, el azar no es más que una palabra para designar nuestra ignorancia. Al tema le consagró un texto entero, *Essai philosophique sur les probabilités*. Dentro de lo que se ha dado en llamar "inferencia bayesiana", Laplace se proponía obtener, por deducción, un resultado ideal, antes de examinar las diferencias entre valores teóricos y valores observados. Formulaba esa diferencia en una expresión diferencial, para hallar luego las condiciones que permitían minimizar la función. La cuestión terminaría por resolverse, andando el tiempo, con el advenimiento de la teoría de mínimos cuadrados.

El sueño de su vida fue la redacción del monumental *Traité de mécanique céleste*. En el libro primero, impreso en 1799, añadía a los principios generales la cuestión del equilibrio y del movimiento de los líquidos, necesarios para explicar la forma de la Tierra y abordar los fenómenos de las mareas. En el libro segundo, de 1799, muestra la confirmación observacional de la ley de la gravedad universal. En los dos siguientes, aparecidos respectivamente en 1802 y 1805, aplicó la teoría a los datos de posición. Veinte años más tarde Laplace publicó un quinto volumen de más de cuatrocientas páginas, que consideraba un anexo sobre el estado de sus investigaciones. La *Mécanique céleste* estaba concebida como un tratado matemático.

—Luis Alonso

Nacimiento de un clásico

Landmarks Writings in Western Mathematics 1640-1940. Dirigido por I. Grattan Guinness. Elsevier; Amsterdam, 2005.

En la bibliografía historiográfica de la matemática, este libro dirigido por I. Grattan Guinness constituye una sugerente innovación que, a buen seguro, hallará pronto continuadores en otras disciplinas. Se desarrolla en 77 artículos, o capítulos, sobre 89 escritos nucleares de la matemática publicados entre mediados del siglo XVII y finales del primer tercio del XX, es decir, entre la *Geometria* de René Descartes y los *Grundlagen der Mathematik* de David Hilbert y Paul Bernays. La obra recoge los fundamentos de la matemática pura y aplicada, de la probabilidad y estadística, de metamatemática y filosofía. En una simbiosis muy ágil, se teje la biografía del autor con las circunstancias de la preparación del texto comentado. Aunque la mayoría de los artículos se centran en un solo escrito, puede incluirse más de uno en razón de la conexión interna del tema; por ejemplo, la versión de G. W. Leibniz del cálculo a través de tres artículos. El orden de los capítulos sigue la secuencia temporal de los escritos estudiados. Se acota la fecha de arranque en el momento en que la matemática (y la ciencia en general) alcanza carta de reconocimiento social, impulsado desde las instituciones que se van fundando —la Regia Sociedad de Londres y la Academia de Ciencias de París— y vehiculado por las revistas recién creadas. Por botón de muestra, las *Acta Eruditorum*.

En vísperas de ese movimiento, la geometría era euclídea, si bien el repertorio de curvas y superficies se había extendido mucho más allá del elenco aportado en los *Elementos* de Euclides. Para determinar tangentes a curvas o superficies cerradas por ellas se recurría a métodos precalculistas. En conexión con ello se desarrollaron algunas funciones y series, así como ciertos recursos numéricos, logaritmos en especial. El álgebra consideraba las propiedades de las ecuaciones polinómicas. La mecánica se abría todavía en una división de dominios, celeste y terrestre. La trigonometría, planar y esférica, formaba parte del armamentario matemático de la cartografía y la astronomía. Apenas se había avanzado en teoría de la probabilidad y estadística. Grandes figuras de esa prehistoria inmediata: Johannes Kepler, Galileo Galilei, Simon Stevin John Napier y Thomas Harriot.

Ante esa situación, cobra sumo interés la atención aquí prestada a los cimientos del nuevo orden matemático. Lo instaura René Descartes y su *Géometrie*, aparecida en 1637 y tramada con tres hilos conductores: la aceptabilidad de las curvas, el problema de Pappus y la construcción de raíces mediante curvas. Cada resultado geométrico se describe por "construcción-demostración", es decir, el enunciado del resultado y detalles de la prueba. De los tres libros de que consta, el primero arranca con varias definiciones de la notación novedosa. Amén de las cinco operaciones usuales, incluida la extracción de raíces, Descartes introdujo un segmento de longitud unitaria para asegurar la homogeneidad física subyacente de expresiones escritas; las letras designan longitud de segmentos, o números positivos. Junto con los exponentes cartesianos los símbolos de las operaciones básicas comprenden expresiones tales como $a + b$, ab y $\sqrt{aa + bb}$. Y propone cómo "construirlas" geométricamente con regla y compás.

Mostrándose crítico con la categorización de Pappus sobre el plano, curvas sólidas y lineales, ofrece en la *Géometrie* dos criterios de aceptabilidad. Para Pappus las curvas del "plano" eran las construibles mediante regla y compás, las curvas "sólidas" designaban las secciones cónicas y las curvas "lineales" o "mecánicas" comprendían el resto. Descartes aporta los cartabones, ideados para resolver ecuaciones cúbicas, inserir medias proporcionales y construir curvas. El llamado "problema de Pappus sobre tres o cuatro líneas" se convirtió en modelo para la generación de curvas aceptables de acuerdo con el criterio de *algebracidad*. Aparece en el libro primero, en una ecuación, la distancia de un punto a una recta dada como función afín de las coordenadas, $CH = ax + by + c$. Después de 1637, Descartes abandonó su trabajo teórico en matemática, incluso las nuevas cuestiones que había planteado en la *Géometrie*. No mostró interés alguno por las ecuaciones de segundo grado y muchísimo menos por la clasificación de las cúbicas. Eso fue realizado por Newton en la *Enumeratio linearum tertii ordinis*, publicada en 1704. Influido por la *Géometrie*, Newton aprendió que el estudio de las curvas del plano podía abordarse en términos algebraicos. Dedicó particular atención al trazado de tangentes a las curvas y a la determinación del área subtendida en una curva.

En esa época germinal, la invención del cálculo diferencial e integral en los artículos de Leibniz aludidos (1684: "Nova methodus pro maximis et minimus, itemque tangentibus, quae nec fractas, nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus"; 1686: "De geometria recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum", y 1693: "Supplementum geometriae dimensoriae, seu generalissima omnium tetragonismorum effectio per motum: similiterque multiplex constructio lineae ex data tangentium conditione") como un hito básico y revolucionario. Leibniz y Newton llegaron por vía independiente a la invención del cálculo infinitesimal. El germano, que lo publicó antes, lo había descubierto entre 1672 y 1676, cuando se hallaba en París en misión diplomática.

En el primero de los artículos se abría Leibniz con la introducción de curvas referidas al eje *x*, variables (abscisas y ordenadas) y tangentes. En ese contexto geométrico, no aparece todavía ni el concepto de función, ni se distinguían de las independientes las variables dependientes. El artículo segundo (que podríamos traducir "Sobre la geometría profunda y el análisis de los indivisibles e infinitos") es el primer trabajo publicado sobre cálculo integral; en él se introduce la "sumación" (el *calculus summatorius*) y la integración se presenta como el proceso inverso de la diferenciación.

Los resultados publicados en las *Acta eruditorum* y en las memorias de las Academias de París y Berlín, ofrecían una solución final a problemas abiertos tales como los de la catenaria, la braquistocrona, la velaria (curva de la vela del barco agitada por el viento), la isocrona paracéntrica, la elástica y problemas isoperimétricos. La difusión del análisis de Leibniz corrió por Europa entera a través de una red tupida de conocidos, como los hermanos Bernoulli, Malebranche o el marqués de l'Hôpital. Aparecieron las primeras obras sobre cálculo integral, de Louis Carré en 1700 y Charles René Reyneau en 1708. Pero el éxito se hizo pronto amargo tras la acusación de plagio por Newton y sus seguidores, con el método sintético de las fluxiones.

Antes de los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), se matematizaba sólo el movimiento parabólico. Con su obra, Newton llevó la matematización exacta a otros campos: atracción ejercida por cuerpos extensos, movimientos perturbados de muchos cuerpos en interacción gravitatoria y movimiento en medios que oponen resistencia. Desde entonces, una misma ley física gobernaba los fenómenos terrestres y celestes.

Para abordar la gravitación universal en términos matemáticos Newton tenía que adentrarse en un territorio desconocido. Hasta la sección 8 del libro I, operaba con un cuerpo que se movía en un campo central de fuerzas. Sabía, empero, que ese modelo matemático podía aplicarse sólo aproximadamente al sistema planetario. En la práctica, cuando uno considera un sistema compuesto de dos cuerpos, 1 y 2, suficientemente alejado de otros cuerpos perturbadores y suficientemente alejados entre sí, y 1 tiene una masa mucho mayor que 2, entonces podemos aproximarnos a 1 como centro inmóvil de fuerza y a 2 como masa puntual. El libro II, dedicado al movimiento de los cuerpos en medios que oponen resistencia, abunda en resultados matemáticos; inaugura los métodos variacionales al enfrentarse al problema del sólido de menor resistencia. En el libro III aplicó a la astronomía los resultados matemáticos obtenidos en el primer libro, e infiere que los movimientos planetarios están causados por una fuerza gravitatoria.

El lenguaje matemático de la física newtoniana envejeció muy pronto. Tras las obras de Pierre Varignon, Johann Bernoulli, Leonhard Euler, Alexis-Claude Clairaut, Jean le Rond d'Alembert, Joseph Luis Lagrange y Pierre Simon de Laplace, la mecánica analítica se expresó en términos de ecuaciones diferenciales parciales y ordinarias y en cálculo de variaciones. Los intentos por mejorar el tratamiento matemático de los tres cuerpos, la determinación del sólido de menor resistencia o la atracción de elipsoides de revolución, desarrollados por Euler, d'Alembert y Lagrange cambiaron la escena de la matemática. En particular, la *Méchanique analitique* (1788) de este último.

—*L.A.*





COMPUTACION CON NUDOS CUANTICOS, por Graham P. Collins

El trenzado en el espaciotiempo de las trayectorias de ciertas partículas exóticas, los "anyones", podría abrir caminos hacia la aplicación práctica de la computación cuántica.



AVANCES EN VEHICULOS HIBRIDOS, por Joseph J. Romm y Andrew A. Frank

Conforme crece la aceptación de los coches que combinan gasolina y electricidad, se vislumbra una nueva generación de híbridos menos agresivos contra el medio.

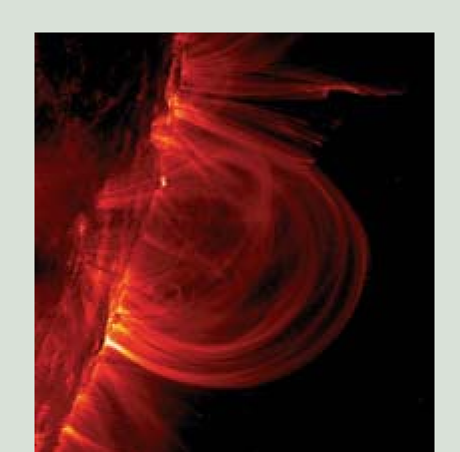


¿POR QUE ALGUNOS ANIMALES SON TAN INTELIGENTES?, por Carel van Schaik

El insólito comportamiento de los orangutanes de un pantano de Sumatra sugiere que el aprendizaje potencia la capacidad mental.

LA ENERGIA FANTASMA Y EL FUTURO DEL UNIVERSO, por Pedro F. González Díaz

La energía oscura, a la que se debe la actual expansión acelerada del universo, podría hacer que los agujeros de gusano, conexiones entre partes separadas del espaciotiempo, creciesen hasta abarcar el universo entero.



EL ORIGEN DE LAS FULGURACIONES SOLARES, por Gordon D. Holman

Observaciones recientes arrojan luz sobre los mecanismos que encienden estas explosiones colosales de la atmósfera del Sol.